

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Junta Administradora de Servicios Eléctricos de Cartago**



**Propuesta de mejoramiento de los sistemas de protección de la red eléctrica –  
circuito Cerrillos**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Roberto Vega Axtle**

**Cartago, enero de 2010**

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

A handwritten signature in dark ink, consisting of stylized, overlapping loops and curves, positioned above a horizontal line.

Ing. Carlos Badilla  
Profesor lector

A handwritten signature in dark ink, featuring a prominent vertical stroke and several loops, positioned above a horizontal line.

Ing. Juan Carlos Jiménez Robles  
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, enero de 2010

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Enero 2010

Roberto Vega

Roberto Vega Axtle  
Céd: 3-393-973

## Resumen

La empresa JASEC se encarga de brindar el servicio de suministro de energía eléctrica en la provincia de Cartago. La empresa intenta en todo momento mantener un servicio continuo y sin cortes, y para ello emplea sistemas de protección. Sin embargo, estos sistemas de protección actualmente no funcionan de manera coordinada, esto es, no aíslan fallas de manera efectiva, y permiten que mayor cantidad de clientes se vean afectados al presentarse una falla.

Para lograr el funcionamiento coordinado deseado, se pretende realizar un levantamiento de los parámetros de configuración programados en los dispositivos de protección, para así analizar el comportamiento actual de la red ante una falla, esto con ayuda del software de simulación ETAP. Luego, con los resultados de la simulación, y tomando en cuenta estándares requeridos por la empresa y el comportamiento de la red, determinar cuáles dispositivos requieren una nueva configuración. Finalmente, se pretende obtener los parámetros de configuración que permitan un comportamiento coordinado, y validarlos mediante la simulación en el software mencionado anteriormente, todo esto tomando en cuenta todas las posibles condiciones de funcionamiento de la red.

**Palabras claves:** recloser, reconectador, red de suministro eléctrico, coordinación de protecciones, análisis de corrientes de corto-circuito.

## **Abstract**

JASEC is the company in charge of the electrical power distribution in Cartago. This company tries to keep a continuous energy supply at all times, and to ensure that, they use protection systems. Nevertheless, this protection systems actually are not working in a coordinate way, this is, they fail at isolating faults in an effective way, letting a larger amount of costumers get affected in case of a fault.

To achieve the desired coordinated behavior, is pretended to obtain the configuration data programmed at the protection devices, and with this data be able to analyze the net's actual behavior in a fault scenario, all of this with the help of ETAP simulation software. After this, using the simulation results among with standards required by the company, and the net's characteristics and behavior, be able to determine which of the protection devices require a new configuration. Finally, it is intended to obtain the configuration data that allow a coordinated response from the protection devices, and validate them running a simulation on the ETAP software, and in all the possible net's different working scenarios.

**Keywords:** recloser, power distribution, coordination of protective devices, short-circuit current analysis.

## Dedicatoria

*A mis padres...*

## **Agradecimiento**

*A mis padres y familiares que de una forma u otra me apoyaron a lo largo de todos mis estudios.*

*A los profesores de la Escuela de Ingeniería Electrónica por el trabajo que realizan en la formación de nuevos ingenieros.*

*Al Ing. Mario Jiménez por darme la gran oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en una empresa tan grande e importante como es JASEC, y al personal de la misma por la ayuda brindada durante el desarrollo del proyecto.*

## INDICE GENERAL

|                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1: Introducción .....</b>                                                                                           | <b>16</b> |
| 1.1 Necesidad e importancia del funcionamiento coordinado entre los sistemas de protección empleados por la empresa JASEC ..... | 16        |
| 1.2 Definición de los parámetros de configuración de los reconectadores para lograr un funcionamiento coordinado.....           | 18        |
| <b>Capítulo 2: Meta y objetivos.....</b>                                                                                        | <b>22</b> |
| 2.1 Meta.....                                                                                                                   | 22        |
| 2.2 Objetivo general.....                                                                                                       | 22        |
| 2.3 Objetivos específicos .....                                                                                                 | 22        |
| <b>Capítulo 3: Marco teórico .....</b>                                                                                          | <b>24</b> |
| 3.1 Estudio de corrientes de cortocircuito .....                                                                                | 24        |
| 3.1.1 Falla trifásica sólida .....                                                                                              | 25        |
| 3.1.2 Falla de fase a fase sólida.....                                                                                          | 25        |
| 3.1.3 Falla de línea a tierra sólida.....                                                                                       | 26        |
| 3.2 Las corrientes de cortocircuito .....                                                                                       | 26        |
| 3.3 Equipos de protección contra sobrecorrientes .....                                                                          | 29        |
| 3.3.1 Los reconectadores.....                                                                                                   | 31        |
| 3.3.2 Protecciones que ofrecen los reconectadores .....                                                                         | 34        |
| 3.3.3 Datos técnicos de los reconectadores del circuito Cerrillos.....                                                          | 40        |
| <b>Capítulo 4: Procedimiento metodológico .....</b>                                                                             | <b>43</b> |
| 4.1 Investigación bibliográfica.....                                                                                            | 43        |
| 4.2 Obtención de datos de configuración de los reconectadores.....                                                              | 43        |
| 4.3 Medición de corrientes de línea del circuito Cerrillos .....                                                                | 44        |
| 4.4 Uso del paquete computacional ETAP .....                                                                                    | 45        |
| 4.5 Redacción de documentación .....                                                                                            | 46        |
| <b>Capítulo 5: Estado actual de los sistemas de protección y mediciones experimentales .....</b>                                | <b>47</b> |
| 5.1 Red de distribución eléctrica de la empresa JASEC .....                                                                     | 47        |



|                                                                                  |                                                                                           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2                                                                              | El circuito Cerrillos .....                                                               | 48        |
| 5.3                                                                              | Configuración actual de las protecciones de los re conectadores .....                     | 51        |
| 5.4                                                                              | El circuito La Flor.....                                                                  | 52        |
| 5.5                                                                              | Corrientes de línea de los circuitos .....                                                | 53        |
| 5.6                                                                              | Corrientes máximas en los re conectadores.....                                            | 58        |
| 5.7                                                                              | Corrientes de cortocircuito .....                                                         | 59        |
| <b>Capítulo 6: Descripción del proceso de coordinación de protecciones .....</b> |                                                                                           | <b>60</b> |
| 6.1                                                                              | Criterios utilizados para la definición de nuevos parámetros .....                        | 60        |
| 6.1.2                                                                            | Selección de la corriente de disparo .....                                                | 61        |
| 6.1.3                                                                            | Selección del diferencial de tiempo entre las curvas de corriente-tiempo.....             | 61        |
| 6.1.4                                                                            | Selección de las curvas de corriente-tiempo y los modificadores .....                     | 62        |
| 6.1.5                                                                            | Definición de alternativas de configuración.....                                          | 66        |
| 6.2                                                                              | Parámetros de configuración de los re conectadores del circuito Cerrillos .....           | 66        |
| 6.3                                                                              | Parámetros de configuración de los re conectadores del circuito La Flor .....             | 67        |
| 6.4                                                                              | Parámetros de configuración de los re conectadores de enlace del circuito Cerrillos ..... | 68        |
| 6.4.1                                                                            | Reconectador Miravalles .....                                                             | 68        |
| 6.4.2                                                                            | Reconectador Puente Tejar .....                                                           | 69        |
| 6.4.3                                                                            | Reconectador Extremos .....                                                               | 70        |
| 6.4.4                                                                            | Reconectador Concorde .....                                                               | 71        |
| 6.4.5                                                                            | Cuchillas 230.....                                                                        | 73        |
| <b>Capítulo 7: Análisis de resultados.....</b>                                   |                                                                                           | <b>75</b> |
| 7.1                                                                              | Resultados de la simulación.....                                                          | 76        |
| 7.2                                                                              | Análisis .....                                                                            | 84        |
| <b>Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones.....</b>                           |                                                                                           | <b>87</b> |
| 8.1                                                                              | Conclusiones .....                                                                        | 87        |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 8.2 Recomendaciones .....                                    | 88 |
| Bibliografía .....                                           | 89 |
| Apéndices .....                                              | 90 |
| A.1 Resultados y curvas para los reconectores de enlace..... | 90 |

## INDICE DE FIGURAS

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Demostración de funcionamiento coordinado y no coordinado entre dispositivos de protección.....   | 18 |
| Figura 1.2 Diagrama de flujo del proyecto .....                                                              | 21 |
| Figura 3.1 Representación de tipos de fallas en una red eléctrica trifásica.....                             | 25 |
| Figura 3.2 Aportes de las distintas fuentes de cortocircuito.....                                            | 28 |
| Figura 3.3 Forma de onda típica de una corriente de cortocircuito.....                                       | 29 |
| Figura 3.4 Reconectador Nu-Lec modelo N38 [5] .....                                                          | 33 |
| Figura 3.5 Composición interna de un interruptor de potencia [5] .....                                       | 34 |
| Figura 3.6 Curvas de corriente-tiempo ANSI.....                                                              | 37 |
| Figura 3.7 Efecto de los modificadores sobre las curvas de corriente-tiempo [5] .....                        | 38 |
| Figura 5.1 Diagrama de conexión de las subestaciones .....                                                   | 48 |
| Figura 5.2 Diagrama de conexión de los reconectadores del circuito Cerrillos .....                           | 49 |
| Figura 5.3 Diagrama de conexión de los reconectadores del circuito La Flor.....                              | 52 |
| Figura 5.4 Comportamiento de las corrientes de fase del circuito Cerrillos.....                              | 54 |
| Figura 5.5 Comportamiento de las corrientes de fase del circuito Grupo Z.....                                | 55 |
| Figura 5.6 Comportamiento de las corrientes de fase del circuito Tejar-Guadalupe .....                       | 56 |
| Figura 5.7 Comportamiento de las corrientes de fase del circuito La Flor.....                                | 57 |
| Figura 6.1 Valor del dial para un diferencial de 120ms entre dos curvas Kyle 101 .....                       | 63 |
| Figura 6.2 Valor del dial para un diferencial de 120ms entre curvas Kyle 101 y Kyle 119 .....                | 63 |
| Figura 6.3 Coordinación utilizando diales de 0,4 y 1 en las curvas Kyle 119 y Kyle 101 respectivamente ..... | 64 |
| Figura 6.4 Dial necesario para separar 120ms dos curvas Kyle 119 .....                                       | 65 |
| Figura 6.5 Curvas graficadas manteniendo el diferencial de tiempo mínimo de 120ms .....                      | 65 |
| Figura 7.1 Curvas programadas actualmente en reconectadores en cascada en el circuito Cerrillos.....         | 76 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 7.2 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Bermejo.....                                                  | 77 |
| Figura 7.3 Curvas propuestas para reconectores en cascada en el circuito Cerrillos.....                                       | 77 |
| Figura 7.4 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Bermejo con las curvas<br>propuestas.....                     | 78 |
| Figura 7.5 Curvas actuales para los reconectores implicados con el cierre del reconectador<br>Concorde .....                  | 78 |
| Figura 7.6 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Concorde .....                                                | 79 |
| Figura 7.7 Curvas propuestas para los reconectores implicados con el cierre del<br>reconectador Concorde .....                | 79 |
| Figura 7.8 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Concorde .....                                                | 80 |
| Figura 7.9 Curvas actuales de reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor .....                                         | 81 |
| Figura 7.10 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador PI Coca Cola.....                                            | 82 |
| Figura 7.11 Curvas propuestas para reconectores de Cerrillos y La Flor involucrados en el<br>cierre de las Cuchillas 230..... | 82 |
| Figura 7.12 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador PI Coca Cola.....                                            | 83 |
| Figura A.1.1 Curvas actuales de los reconectores implicados con el cierre del<br>reconectador Miravalles .....                | 90 |
| Figura A.1.2 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Miravalles.....                                             | 91 |
| Figura A.1.3 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del<br>reconectador Miravalles .....              | 91 |
| Figura A.1.4 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Miravalles.....                                             | 92 |
| Figura A.1.5 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del<br>reconectador Miravalles .....              | 92 |
| Figura A.1.6 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Miravalles.....                                             | 93 |
| Figura A.1.7 Curvas actuales de los reconectores del circuito Cerrillos y el reconectador<br>Extremos.....                    | 94 |
| Figura A.1.8 Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Extremos.....                                               | 94 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A.1.9 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Extremos .....      | 95  |
| Figura A.1.10 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Extremos.....                                 | 95  |
| Figura A.1.11 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Extremos .....     | 96  |
| Figura A.1.12 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Bazar Mary .....                              | 97  |
| Figura A.1.13 Curvas actuales de los reconectores del circuito Cerrillos y el reconector Puente Tejar.....     | 97  |
| Figura A.1.14 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Manuel de Jesús Jiménez.....                  | 98  |
| Figura A.1.15 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Puente Tejar ..... | 98  |
| Figura A.1.16 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Puente Tejar.....                             | 99  |
| Figura A.1.17 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Puente Tejar ..... | 99  |
| Figura A.1.18 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Bazar Mary .....                              | 100 |
| Figura A.1.19 Curvas actuales de los reconectores del circuito Cerrillos y el reconector Concorde .....        | 100 |
| Figura A.1.20 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Concorde .....                                | 101 |
| Figura A.1.21 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Concorde.....      | 102 |
| Figura A.1.22 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Concorde .....                                | 102 |
| Figura A.1.23 Curvas actuales de los reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor...                      | 103 |
| Figura A.1.24 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector PI Coca Cola .....                            | 104 |
| Figura A.1.25 Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre de las Cuchillas 230.....         | 104 |
| Figura A.1.26 Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Bermejo.....                                  | 105 |

## INDICE DE TABLAS

|           |                                                                                                            |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 | Valores de las constantes para las curvas de corriente-tiempo ANSI .....                                   | 36 |
| Tabla 3.2 | Valores configurables en los gabinetes de control relacionados con la protección de tiempo inverso .....   | 41 |
| Tabla 3.3 | Tolerancia y tiempos máximos para los interruptores de potencia .....                                      | 42 |
| Tabla 5.1 | Configuración actual de la protección de tiempo inverso en los reconectadores del circuito Cerrillos ..... | 51 |
| Tabla 5.2 | Configuración actual de la protección de tiempo inverso en los reconectadores del circuito La Flor .....   | 53 |
| Tabla 5.3 | Valores promedio de las corrientes de fase del circuito Cerrillos .....                                    | 54 |
| Tabla 5.4 | Valores promedio de las corrientes de fase del circuito Grupo Z .....                                      | 55 |
| Tabla 5.5 | Valores promedio de las corrientes de fase del circuito Tejar-Guadalupe.....                               | 56 |
| Tabla 5.6 | Valores promedio de las corrientes de fase del circuito La Flor .....                                      | 57 |
| Tabla 5.7 | Valores máximos de corriente de línea de los circuitos .....                                               | 58 |
| Tabla 5.8 | Valores de corriente máximos medidos en los reconectadores de los circuitos Cerrillos y La Flor .....      | 58 |
| Tabla 5.9 | Corrientes de cortocircuito para cada reconectador del circuito Cerrillos .....                            | 59 |
| Tabla 6.1 | Configuración de los reconectadores del circuito Cerrillos.....                                            | 67 |
| Tabla 6.2 | Configuración de los reconectadores del circuito La Flor .....                                             | 67 |
| Tabla 6.3 | Configuración del reconectador Miravalles y los reconectadores afectados con su cierre.....                | 69 |
| Tabla 6.4 | Configuración del reconectador Puente Tejar y los reconectadores afectados con su cierre .....             | 70 |
| Tabla 6.5 | Configuración del reconectador Extremos y los reconectadores afectados con su cierre.....                  | 71 |
| Tabla 6.6 | Configuración del reconectador Concorde y los reconectadores afectados con su cierre.....                  | 72 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 6.7 Configuración de los reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor afectados por el cierre de las Cuchillas 230..... | 74 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## **Capítulo 1: Introducción**

Este capítulo tiene la intención de familiarizar al lector con la empresa JASEC y su actual necesidad de mejorar los sistemas de protección que utiliza en la red de suministro eléctrico en la provincia de Cartago, y con la forma en que se pretende mejorar el funcionamiento de los mismos.

### **1.1 Necesidad e importancia del funcionamiento coordinado entre los sistemas de protección empleados por la empresa JASEC**

En la provincia de Cartago, la empresa encargada del suministro de energía eléctrica es la Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC). En una red de distribución eléctrica se presentan diversos factores no controlables por la empresa, y que provocan fallas en la red. Estos factores pueden ser por ejemplo: sabotaje, accidentes que provoquen la ruptura de un cable o de un poste de tendido eléctrico, factores atmosféricos como humedad excesiva, tormentas eléctricas, árboles que caen sobre los cables, entre otros. Estos causantes de fallas impiden a la empresa cumplir su más importante objetivo, que es brindar un servicio eléctrico continuo y de calidad, debido a la importancia que tiene hoy en día la energía eléctrica para la industria, el comercio y los hogares.

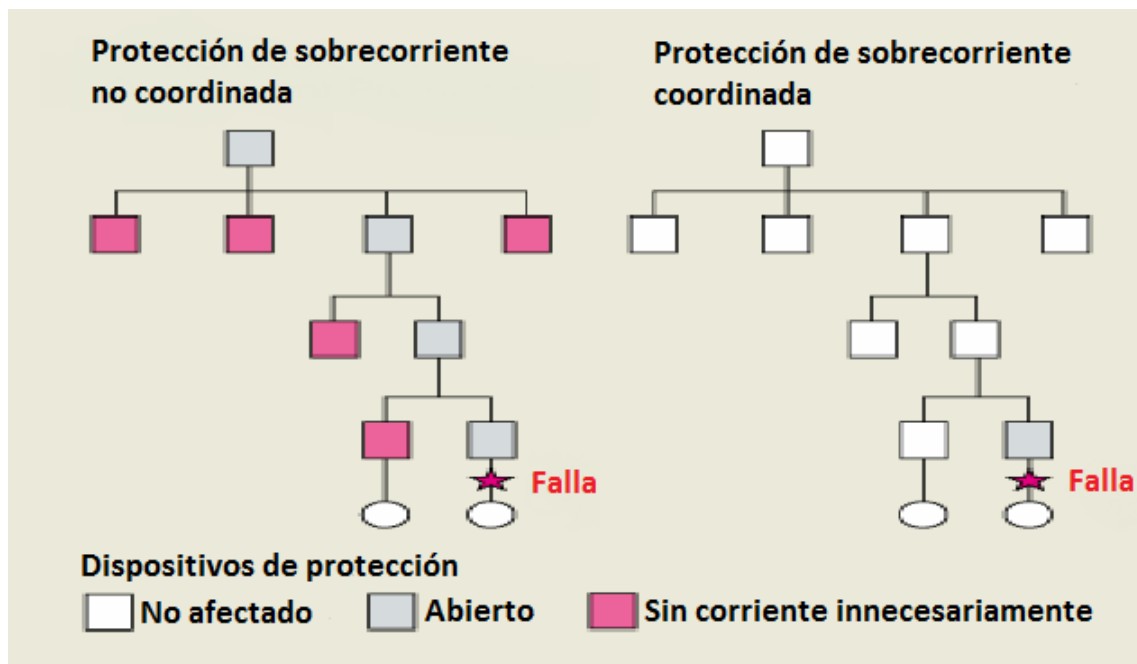
La red de distribución de energía eléctrica se encuentra dividida en subredes que emplean dispositivos de protección conocidos como reconectadores, con el fin de minimizar los efectos perjudiciales de las fallas mencionadas. Estas protecciones eléctricas deben presentar un funcionamiento coordinado, esto es, al presentarse una falla, debe darse una selectividad entre dispositivos que la detecten, con el fin de que sea el más próximo en el sentido de la corriente el que interrumpa el flujo y controle la falla. De esta manera se reduce el número de usuarios afectados por la interrupción en el servicio eléctrico, además de que permite a la empresa reparar la falla y restablecer el servicio en un menor tiempo al tener el personal de mantenimiento que revisar un área menor para la localización y reparación correspondiente.



Para lograr este funcionamiento coordinado, los reconectores poseen una unidad de control en la cual es posible configurar diversos parámetros como son: corriente de disparo, tipo de curva de corriente – tiempo, número de recierres y selección de grupo de protección activa, entre otros.

Actualmente las configuraciones de los parámetros en los distintos reconectores se encuentran obsoletas, esto porque fueron establecidas hace 4 años, y en ese tiempo la demanda de potencia ha aumentado. Producto de esto, en algunos casos lo que se ha hecho es aumentar el umbral de detección del reconector, reduciendo la sensibilidad del mismo ante fallas. Sumado a esta situación, hay reconectores que se encuentran quemados, y en caso de presentarse una falla estos no interrumpen la circulación de la corriente. El principal problema para la empresa es que al presentarse una falla, el reconector que la aisle probablemente no va a ser el más cercano a la misma, provocando que haya una mayor cantidad de clientes sin servicio eléctrico, además de que al verse afectada un área mayor, le toma más tiempo a la empresa la detección del lugar exacto de la avería. Todo esto provoca una molestia a los clientes, pero más que todo afecta a la empresa, porque dejará de percibir el dinero correspondiente al pago por el servicio durante el tiempo que se encuentre suspendido, además de que deberá incurrir en gastos mayores al tener que desplazar al personal de mantenimiento una distancia mayor hasta la detección de la falla. Aunado a esto, se ven afectados los índices de continuidad del servicio de la empresa, que son utilizados por la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos para evaluar la calidad y continuidad del servicio ofrecido por JASEC, y que además influyen en las tarifas de cobro por el servicio brindado.

El contar con un sistema de protección coordinado ayudará a JASEC a reducir los problemas antes mencionados y así brindar un servicio de mejor calidad. En la figura 1.1 se muestra la comparación entre un sistema coordinado y otro no coordinado.



**Figura 1.1** Demostración de funcionamiento coordinado y no coordinado entre dispositivos de protección

## 1.2 Definición de los parámetros de configuración de los reconectadores para lograr un funcionamiento coordinado

Para la obtención de los parámetros de configuración que permitan obtener un funcionamiento coordinado entre los dispositivos de protección se tomó en cuenta factores como el comportamiento de la red eléctrica en cuanto a demanda de energía por parte de los usuarios, la topografía del circuito de la red y los posibles cambios que puede presentar al utilizar diferentes reconectadores de enlace. Además se consideraron estándares y criterios utilizados por la empresa, como cumplir con diferenciales mínimos de corriente y tiempo en la respuesta de los dispositivos de protección para garantizar el comportamiento deseado. Aunque este proyecto abarcó únicamente al circuito Cerrillos, se debió contemplar además una propuesta de coordinación realizada previamente para los circuitos de Cartago Centro, Grupo Z, San Blas y Tejar-Guadalupe, por parte del estudiante egresado del Instituto Tecnológico de Costa Rica Dennis Calderón Vega, esto con el fin de que las

propuestas sean compatibles entre sí, en cuanto al tipo de curvas de corriente-tiempo y los criterios utilizados en la configuración de los dispositivos de protección; además de una muy necesaria compatibilidad entre las propuestas de configuración para los reconectadores de enlace que unen al circuito Cerrillos con los otros circuitos. Todo con el fin de facilitar al personal de la empresa la implementación de ambas propuestas para coordinar los dispositivos de protección del total de la red compuesta por los distintos circuitos.

Para la definición de los parámetros de configuración de los reconectadores del circuito Cerrillos, lo primero que se hizo fue un recorrido por la red para conocer la localización de cada uno de los reconectadores, además, se recopilaron los datos de configuración de cada uno de ellos con el fin de conocer su funcionamiento actual.

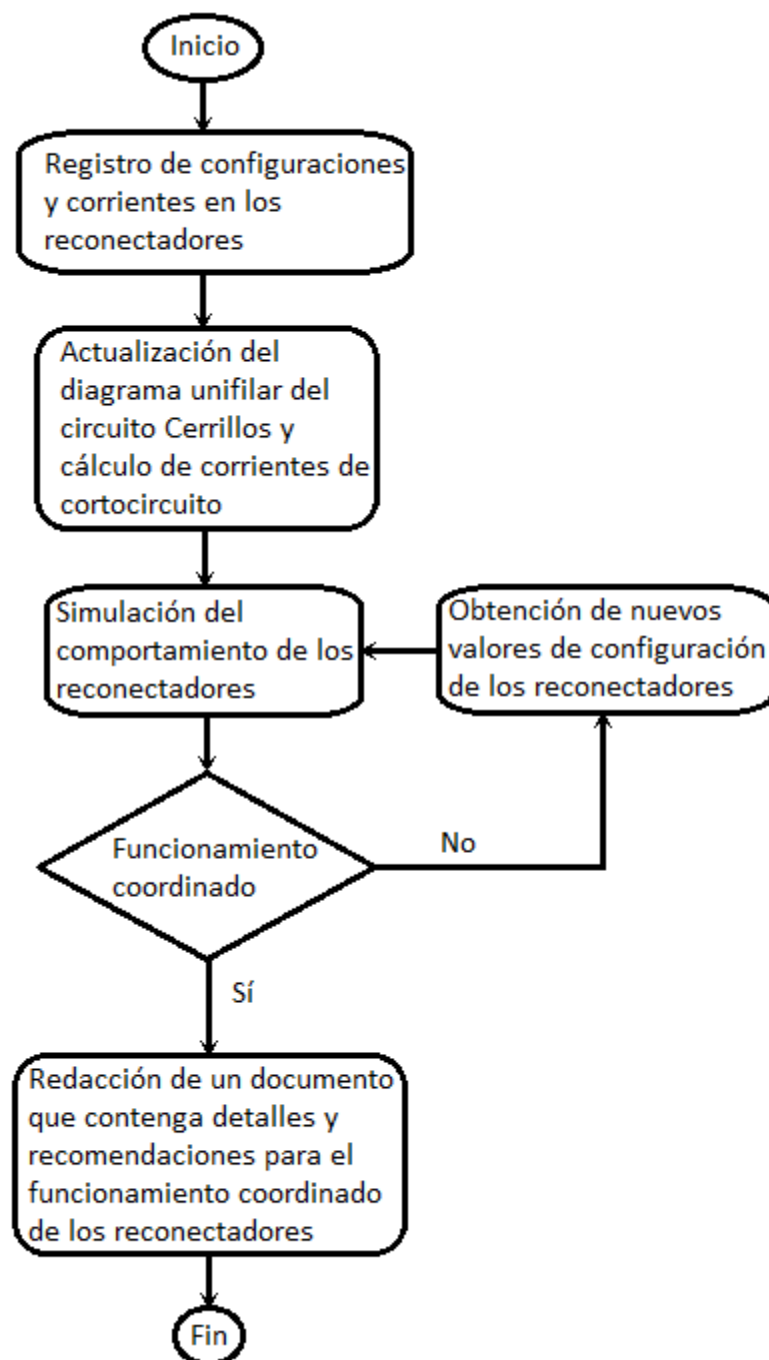
La empresa JASEC poseía de antemano un diagrama unifilar de la red eléctrica confeccionado con ayuda del software ETAP. Este diagrama ya poseía parámetros reales como longitudes e impedancias de las líneas de transmisión, y magnitudes y tipos de cargas. Con ayuda de personal de JASEC, y con la información recopilada en el recorrido de la red, se procedió a actualizar este diagrama unifilar, que consistió en añadir dispositivos de protección que se tiene previsto instalar en el futuro, corroborar la ubicación de los dispositivos de protección actuales, así como definir la marca, modelo y configuración actuales de los mismos.

Una vez actualizado el diagrama unifilar del circuito Cerrillos, se realizó una simulación en el software ETAP para conocer el comportamiento actual de los dispositivos de protección ante fallas en diferentes ubicaciones en la red, y así evaluar la coordinación entre los mismos y evidenciar cuáles necesitaban una modificación en su configuración. Seguidamente, con ayuda del programa ETAP, se realizó el cálculo de las corrientes de cortocircuito para cada uno de los dispositivos de protección, esto con el fin de conocer si los equipos empleados podían tolerar esos niveles de corriente y continuar funcionando sin haber sufrido daño alguno.

En este punto se analizó el comportamiento de las protecciones en la red, según los resultados de la simulación en el software ETAP. Es aquí en donde las gráficas de corriente-tiempo que brinda el software fueron sumamente importantes para evidenciar si se presentaba un funcionamiento coordinado, cumpliendo con los diferenciales de tiempo entre curvas deseado, que en este caso fue de un tiempo mayor que el retardo mecánico de la apertura del interruptor del dispositivo de protección más lento.

Para la deducción de los parámetros a configurar en los reconectadores, primero se tomó muestras de los valores de corriente en cada dispositivo de protección, esto con el fin de conocer el valor máximo de demanda de corriente para determinar entonces el valor apropiado para la corriente de disparo de las protecciones eléctricas. Las curvas de tiempo inverso y los valores de modificadores para estas curvas se definieron y luego se validaron, con ayuda del software ETAP, de manera que cumplieran con la separación deseada en tiempo y en corriente para dispositivos conectados en serie, y con los estándares requeridos por la empresa.

Como último paso, se documentó el proyecto por medio de un informe escrito que contiene el análisis realizado para el comportamiento actual de la red, evidenciando la necesidad de actualizar las configuraciones de las protecciones eléctricas con el fin de obtener un comportamiento coordinado. Además muestra resultados de las simulaciones en el software ETAP que validan los parámetros sugeridos para la programación de las protecciones. Finalmente presenta un conjunto de recomendaciones para lograr la compatibilidad entre las propuestas de coordinación realizadas, así como para optimizar el funcionamiento de las protecciones en la red. La figura 1.2 muestra un diagrama de flujo que muestra el proceso llevado a cabo para la coordinación de las protecciones eléctricas del circuito Cerrillos.



**Figura 1.2** Diagrama de flujo del proyecto

## **Capítulo 2: Meta y objetivos**

### **2.1 Meta**

La Junta Administradora de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC) busca desarrollar e incrementar la calidad de vida de sus abonados por medio de la prestación de servicios públicos competitivos a nivel internacional, esto mediante la innovación tecnológica y la mejora continua. Como parte de esta mejora continua es que se pretende proponer un mejoramiento en los sistemas de protección de la red eléctrica actual evitando la propagación de fallas.

**Indicador:** Funcionamiento de la red eléctrica sin propagación de fallas.

### **2.2 Objetivo general**

Realizar una propuesta para la correcta coordinación y funcionamiento de los reconectores de la red eléctrica “Cerrillos” de Cartago.

**Indicador:** Diferencial mínimo de tiempo entre las curvas de los reconectores mayor al doble de tiempo de respuesta mecánica del reconnector.

### **2.3 Objetivos específicos**

- Recolectar los datos actuales de configuración de los reconectores, así como las corrientes nominales y pico que por ellos circula para determinar cuáles se encuentran funcionando de manera incorrecta.

**Indicador:** Diferencia de corrientes de disparo de los reconectores menor a 50A.

- Llevar a cabo un análisis de corrientes máximas y de cortocircuito para obtener los parámetros de configuración correctos para los reconectores y comparar la respuesta con los datos medidos.

**Indicador:** Diferencia menor a un 10% entre los valores promedio obtenidos y las mediciones experimentales de corriente.

- Efectuar una simulación en el software computacional ETAP para la validación de los parámetros obtenidos.

**Indicador:** Diferencia de corrientes de disparo de los reconectores mayor a 50A.

## **Capítulo 3: Marco teórico**

### **3.1 Estudio de corrientes de cortocircuito**

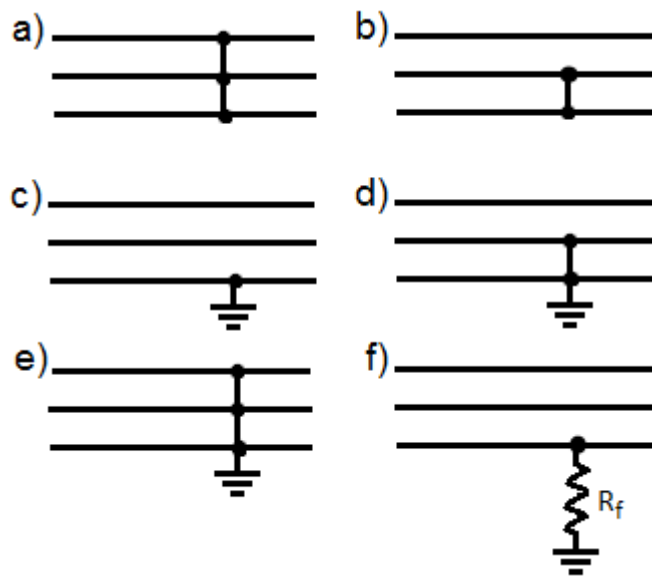
El estudio de corrientes de cortocircuito permite conocer el valor máximo de corriente que puede fluir por un punto de una red eléctrica, que generalmente se presentan cuando se da una falla. Este estudio es la primera etapa a realizar en la coordinación de sistemas de protección, esto porque los cortocircuitos causan que valores altos de corriente se propaguen a través de los dispositivos que se encuentren desde la fuente de energía hacia el punto en donde se localice el mismo. Para tratar de minimizar los efectos dañinos de estas corrientes, se emplean dispositivos de protección que deben reconocer las fallas que se presenten y entonces actuar inmediatamente en la supresión de las corrientes dañinas, por lo tanto estos dispositivos deben ser capaces de soportar el estrés térmico asociado con la circulación de altos niveles de corriente y operar correctamente.

Los resultados del estudio de corrientes de cortocircuito permiten entonces determinar las características que deberán de poseer los equipos de protección para que éstos puedan aislar fallas eficientemente sin sufrir daño alguno.

Actualmente se encuentran disponibles distintos paquetes de software computacional que ayudan en los cálculos del estudio de cortocircuito. El uso de estos paquetes de software permite obtener resultados confiables y precisos, además de reducir el tiempo requerido al tener que realizar los cálculos en diferentes puntos de la red en estudio. También permiten conocer detalles del comportamiento de la red ante distintos tipos de fallas y condiciones de operación. Un ejemplo de estos programas es el software ETAP®, que es el paquete que se utilizó para obtener los datos de corrientes de cortocircuito en los distintos lugares en donde se localizan los reconectadores.

Las causas de cortocircuitos que provocan en las redes eléctricas peligrosos niveles de corriente se deben generalmente a fallas provocadas por distintos factores, y que se representan de manera gráfica en la figura 3.1.





**Figura 3.1** Representación de tipos de fallas en una red eléctrica trifásica

### 3.1.1 Falla trifásica sólida

La falla trifásica sólida, mostrada en la figura 3.1a, se da cuando los tres conductores se unen de forma física, con un valor de impedancia de cero entre ellas. Este tipo de falla no ocurre con mucha frecuencia, pero es la principal a considerar en el cálculo de protecciones debido a que es la que presenta el valor mayor de corriente.

### 3.1.2 Falla de fase a fase sólida

Esta falla, correspondiente a la figura 3.1b, ocurre de igual manera que la falla trifásica sólida, solo que se unen físicamente dos de los tres conductores. Esta falla no siempre se incluye en el cálculo de protecciones debido a que no representa el máximo de nivel de corriente posible, esta es de aproximadamente el 87% de la corriente de falla trifásica sólida.

### **3.1.3 Falla de línea a tierra sólida**

Este tipo de falla es generalmente igual o ligeramente menor que la falla sólida trifásica, en sistemas con el neutro conectado a tierra sólidamente. En sistemas con los neutros conectados a tierra a través de un elevado valor de impedancia el valor de corriente es significativamente menor. Esta falla se considera en el cálculo de protecciones para instalaciones comerciales e industriales que tengan el neutro sólidamente aterrizado en el lado de bajo voltaje.

## **3.2 Las corrientes de cortocircuito**

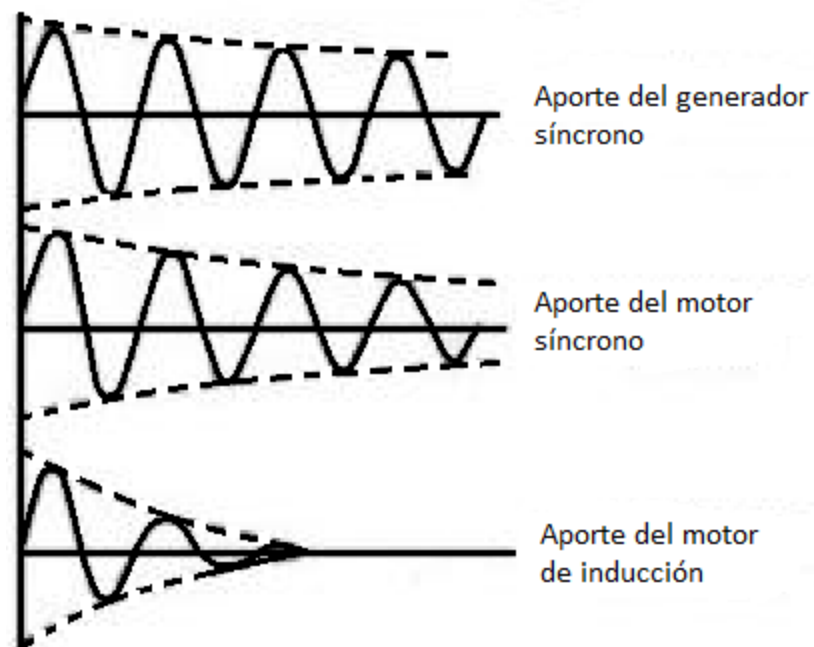
Los cortocircuitos provocan fenómenos inconvenientes como son: [1]

- Se puede dar la fusión de los metales de los conductores, o se puede presentar un arco eléctrico en el punto de la falla.
- Se da una caída de voltaje, cuyo máximo se presenta en el punto de la falla. Las caídas de voltaje en el sistema son proporcionales a las corrientes de cortocircuito.
- Las corrientes de cortocircuito circulan desde las fuentes de energía hacia el punto de localización de la falla.
- Los equipos que se encuentren en la ruta de circulación de las corrientes de cortocircuito se ven sometidos a esfuerzos térmicos y dinámicos que varían con el cuadrado de la corriente y la duración de la misma.

Las principales fuentes de cortocircuito son: los generadores eléctricos, que al ser impulsados por alguna fuente externa, ya sean turbinas o motores de combustión, al presentarse un cortocircuito en la red, el generador continuará generando voltaje al mantenerse su impulsión por parte de la fuente externa y su excitación de campo, produciéndose una corriente de cortocircuito de gran magnitud, limitada únicamente por la impedancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de localización de la falla. Otra fuente son los motores

síncronos, que al presentarse el cortocircuito, su voltaje va a disminuir a un valor muy pequeño y va a dejar de impulsar su carga mecánica, cuya inercia junto con la del rotor del motor van a accionar al motor, convirtiéndolo en un generador síncrono que va a entregar corriente de cortocircuito por varios ciclos después de que se presentó el cortocircuito. Una tercera fuente de cortocircuito la constituyen los motores de inducción, que si bien no tienen devanado de excitación en corriente continua, existe un flujo en el motor durante la operación normal que actúa como el producido por el devanado de campo en el motor síncrono. Si la fuente externa de voltaje se removiera repentinamente, al no poder caer de manera instantánea el flujo en el rotor y al no frenarse este de repente producto de la inercia del mismo rotor y de la carga mecánica, se produce un voltaje en el devanado del estator, produciendo una corriente de cortocircuito que va a circular hacia la falla hasta que el flujo del rotor desaparezca. Esta corriente, cuya magnitud inicial es aproximadamente igual al valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor, depende de la impedancia del motor y de la red en el punto de localización de la falla y desaparece en alrededor de cuatro ciclos.

En la figura 3.2 se muestra el comportamiento de la corriente ante una falla para las máquinas mencionadas anteriormente.



**Figura 3.2** Aportes de las distintas fuentes de cortocircuito

Los aportes de cada máquina se suman para dar con la corriente total de cortocircuito. La impedancia de una máquina rotatoria consiste en principio en una reactancia, que es un valor complejo y variable con el tiempo, por eso la forma de las corrientes que se muestran en la figura 3.2. Para facilitar la explicación del comportamiento de la corriente de cortocircuito, se consideran los siguientes valores de reactancias: [1]

### 1. Reactancia subtransitoria ( $X''_d$ )

Determina el valor de la corriente en los primeros ciclos luego de que la falla ocurre y es la reactancia aparente del devanado del estator en el momento en que se presenta la falla. Se dice que los motores de inducción tienen este tipo de reactancia.

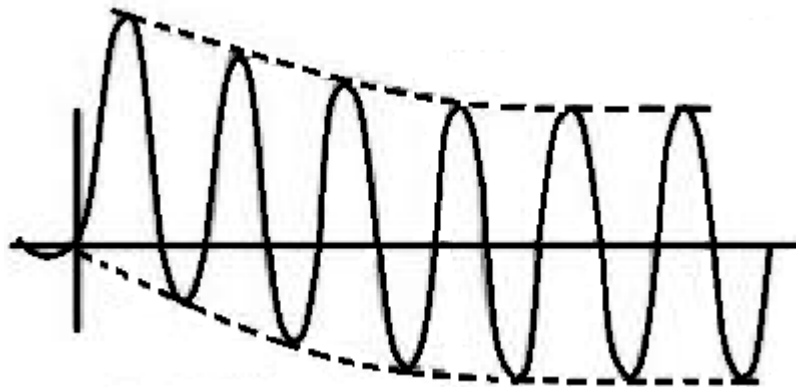
## 2. Reactancia transitoria ( $X'd$ )

Dependiendo del diseño de la máquina, esta reactancia es efectiva después de uno y medio ciclos. Esta reactancia determina el valor de la corriente después de que decae la reactancia subtransitoria.

## 3. Reactancia síncrona ( $X_s$ )

Este tipo de reactancia normalmente no se usa en los estudios de cortocircuito debido a que la misma no es efectiva hasta varios segundos después de que se presenta el cortocircuito. Esta reactancia determina la corriente cuando se llega a una condición de estado permanente.

Durante los primeros ciclos luego de que se presenta el cortocircuito la mayor parte de las corrientes son asimétricas, y tienen su máximo durante el primer ciclo. Unos pocos ciclos después la corriente de cortocircuito se transforma en simétrica. En la figura 3.3 se muestra la forma típica de una corriente de cortocircuito.



**Figura 3.3** Forma de onda típica de una corriente de cortocircuito

### 3.3 Equipos de protección contra sobrecorrientes

Los equipos de protección contra sobrecorrientes han sido diseñados para evitar los daños que puede ocasionar una sobrecarga o corrientes de cortocircuito en un sistema eléctrico. Estos dispositivos deben interrumpir el circuito eléctrico si se

presenta un nivel de corriente que pueda causar una temperatura excesiva y peligrosa en las líneas de transmisión o su aislamiento.

Los requerimientos generales con los que deben cumplir estos dispositivos para proteger contra sobrecorrientes son: [1]

- Operar de manera automática.
- Permitir la circulación de la corriente normal sin causar interrupciones.
- Interrumpir de manera inmediata las corrientes de cortocircuito.
- Poder ser restablecidos o reemplazados de forma sencilla.
- Operar de forma segura en situaciones normales y de sobrecorriente.

Además, para ofrecer protección contra cortocircuitos los dispositivos deben cumplir con las especificaciones que se mencionan a continuación: [1]

- Debe, dentro del rango de capacidad del dispositivo, tener capacidad para cerrar de manera segura sobre cualquier valor de corriente de carga o corriente de cortocircuito.
- De igual manera, dentro del rango de capacidad del dispositivo, debe tener capacidad de abrir, de manera segura, cualquier corriente.
- Dentro de su capacidad de interrupción, debe impedir de forma automática cualquier flujo anormal de corriente.

Los reconectadores son dispositivos que cumplen con las especificaciones para dispositivos de protección mencionadas anteriormente, y son precisamente los equipos empleados por la empresa JASEC en el circuito Cerrillos para proteger en contra de sobrecorrientes.

### **3.3.1 Los reconectadores**

Los reconectadores son equipos de protección que generalmente consisten de dos dispositivos que son el gabinete de control y el interruptor de potencia.

- **Gabinete de control**

En el gabinete de control se encuentra un sistema electrónico que se encarga de realizar las funciones de protección contra sobrecorriente. En ese sistema es posible programar, activar y desactivar las distintas funciones de protección, además de esto, censa diferentes variables de la red en donde se encuentre instalado, como lo son el voltaje y la corriente, y basándose en este censado realiza las funciones de abrir o cerrar el interruptor de potencia, según se requiera. Además lleva un registro de los valores de corriente y voltaje, y al presentarse una falla que amerite la apertura del interruptor de potencia, el sistema registra el valor de corriente que en ese momento circulaba, para calcular el desgaste de los contactos. También posee un puerto para conexión con una PC, y permite acceder los parámetros de programación, así como los registros de memoria para conocer el estado del dispositivo. Para cumplir con la especificación de ser completamente automático, posee baterías para conservar su configuración y registro de datos en caso de quedar sin energía.

- **Interruptor de potencia**

El interruptor de potencia se encarga de interrumpir y restablecer la circulación de la corriente de manera segura, sin importar el valor de la corriente que esté circulando en el momento de la operación. Para realizar la interrupción de corriente de manera segura, es necesario que el dispositivo extinga el arco eléctrico que se forma al abrir los contactos, para esto se utiliza un relleno con sustancias dieléctricas como por ejemplo aire, vacío, gas o aceite. El interruptor de potencia recibe las órdenes de abrir o cerrar sus contactos por parte del gabinete de control.

En conjunto, el gabinete de control y el interruptor de potencia al detectar alguna condición anormal en la red, su función es dar un tiempo programado, desde la detección de la condición anormal y si persiste, entonces abre el interruptor de potencia, luego de la apertura del interruptor deja transcurrir un tiempo determinado antes de volver a cerrar los contactos del interruptor y restablecer el flujo de la corriente. En caso de que la falla persista, se repite el proceso de apertura y recierre, y se repite el proceso un número de veces establecidas en el gabinete de control, y de no corregirse la falla durante el proceso de aperturas y recierres, los contactos del interruptor de potencia permanecerán abiertos y tendrán que ser cerrados de forma manual por parte del personal de mantenimiento.

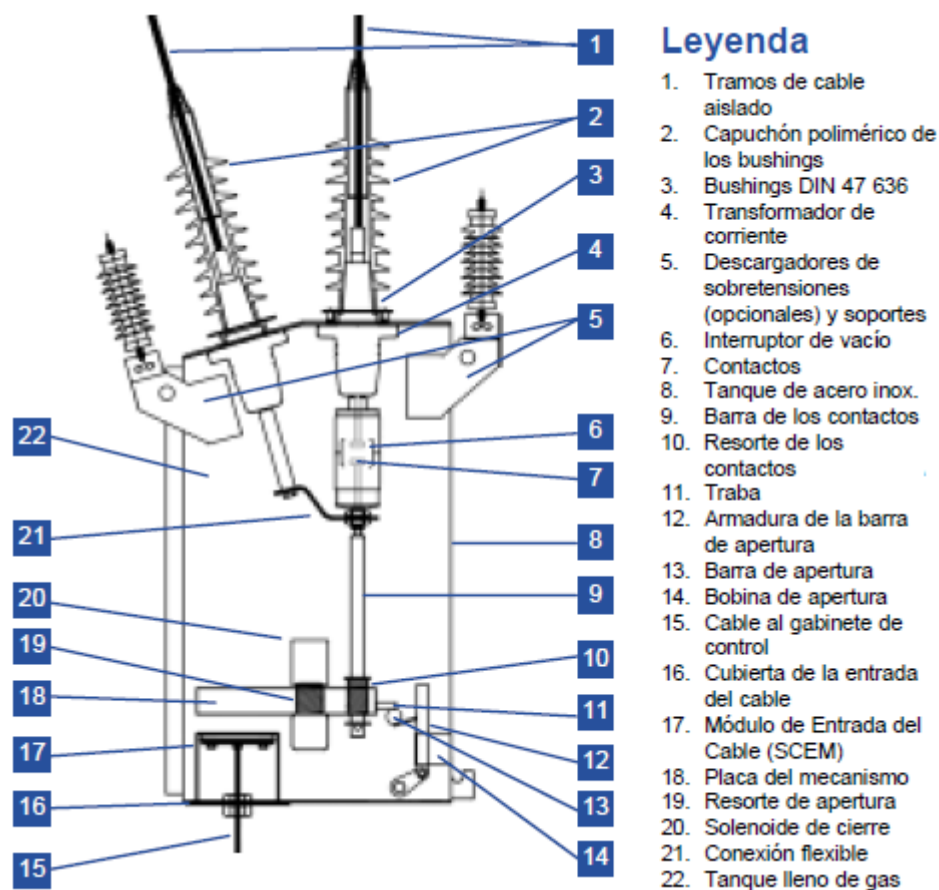
La empresa JASEC utiliza en su mayoría para el circuito Cerrillos reconectores de la marca Nu-Lec, modelo N38. El tanque del interruptor de potencia de este modelo de reconector es llenado con hexafluoruro de azufre o  $SF_6$ . En la figura 3.4 se muestra el reconector Nu-Lec modelo N38.





**Figura 3.4** Reconectador Nu-Lec modelo N38 [5]

En la figura 3.5 se muestra la composición interna de un interruptor de potencia modelo N38.



**Figura 3.5** Composición interna de un interruptor de potencia [5]

### 3.3.2 Protecciones que ofrecen los reconectores

Los reconectores ofrecen diferentes funciones de protección. Cuando se presenta una falla en alguna línea el interruptor de potencia es disparado. Los elementos de protección que pueden activar el interruptor son: falla de tierra, falla de tierra sensitiva, protección de sobrecorriente, protección de pérdida de fase, protección de sobrefrecuencia y baja frecuencia, protección de sobrevoltaje y bajo voltaje, y protección de secuencia de fase negativa. Cada elemento individual de los mencionados puede ser programado para causar un disparo del interruptor. Después de un disparo de cualquier protección va a haber un lapso de tiempo y luego un recierre.

De las protecciones mencionadas, la que es de interés para el funcionamiento coordinado es la protección de sobrecorriente de tiempo inverso.

### **1) Protección de sobrecorriente de tiempo inverso**

Este tipo de protección tiene la característica de que el tiempo para realizar la apertura del interruptor de potencia es inversamente proporcional a la magnitud de la corriente que circule al momento de la falla. Esta protección es implementada de la siguiente manera: la corriente es monitoreada en todo momento, cuando su magnitud aumenta sobre el nivel del umbral de corriente el tiempo para el disparo es calculado y la temporización inicia. Este cálculo se repite cada unos pocos milisegundos en respuesta a los cambios en las corrientes en la línea. Cuando el conteo del tiempo para el disparo finaliza, la orden de apertura de los contactos del interruptor de potencia es realizada. Si la magnitud de la corriente disminuye a un valor menor al umbral de corriente, la temporización para el disparo se detiene, y continúa si la corriente vuelve a aumentar sobre el límite de la corriente de disparo. Si la corriente desciende bajo un 90% del umbral, se inicia un conteo para anular la falla, si este conteo finaliza el conteo de la protección se reinicia. Esto significa que el interruptor de potencia nunca va a abrirse a corrientes menores al umbral de corriente en la protección de tiempo inverso.

Los parámetros que controlan la protección de tiempo inverso son:

- **Curvas de corriente – tiempo o TCC**

La relación inversa entre el tiempo y la corriente utilizada no es lineal, sino que se utilizan curvas inversas. Estas curvas van a definir el tiempo para abrir el interruptor de potencia ante una falla dependiendo del nivel de la corriente de falla que circule. Se dispone entonces de una variedad de curvas que provocan una apertura más rápida o más lenta para un mismo nivel de corriente, según se requiera. Varias de estas curvas se encuentran definidas según estándares

internacionales como IEC y ANSI, y por lo tanto se encuentran definidas por una ecuación.

La ecuación 3.1 define el tiempo de disparo para las curvas ANSI.

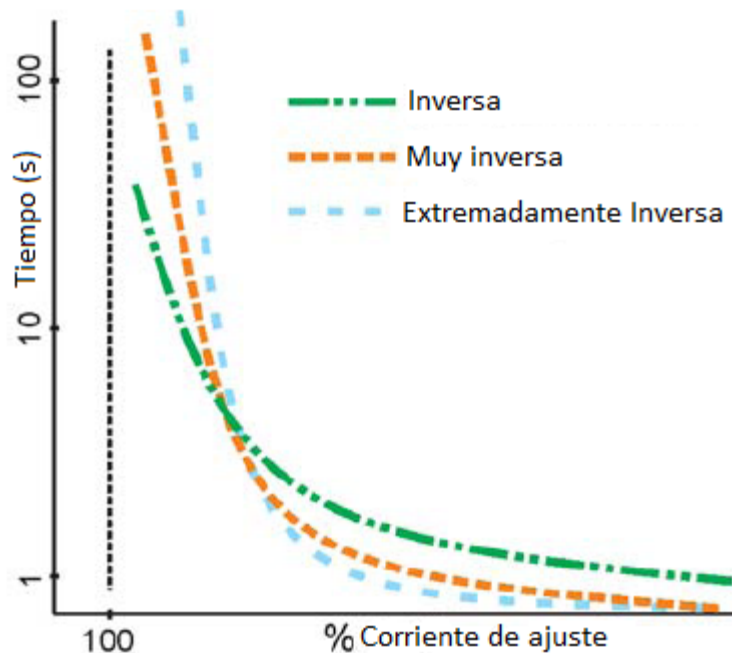
$$Tiempo\_de\_disparo = \left( \frac{A}{M^P - C} + B \right) * \left( \frac{14n - 5}{9} \right) \quad (3.1)$$

En donde M representa múltiplos de la corriente de arranque, que es el cociente de la división de la corriente de cortocircuito y la corriente de disparo predeterminada. La letra n representa el ajuste del dial de tiempo. Las letras A, B y C tienen diferentes valores según el tipo de curva. En la tabla 3.1 se muestra los diferentes valores para estos parámetros. [7]

**Tabla 3.1** Valores de las constantes para las curvas de corriente-tiempo ANSI

| Curva                  | A      | B      | C | P    |
|------------------------|--------|--------|---|------|
| Inversa                | 0,0086 | 0,0185 | 1 | 0,02 |
| Muy inversa            | 2,855  | 0,0712 | 1 | 2    |
| Extremadamente inversa | 6,407  | 0,025  | 1 | 2    |

En la figura 3.6 a continuación se muestra las curvas de corriente-tiempo definidas por normas ANSI. [5]



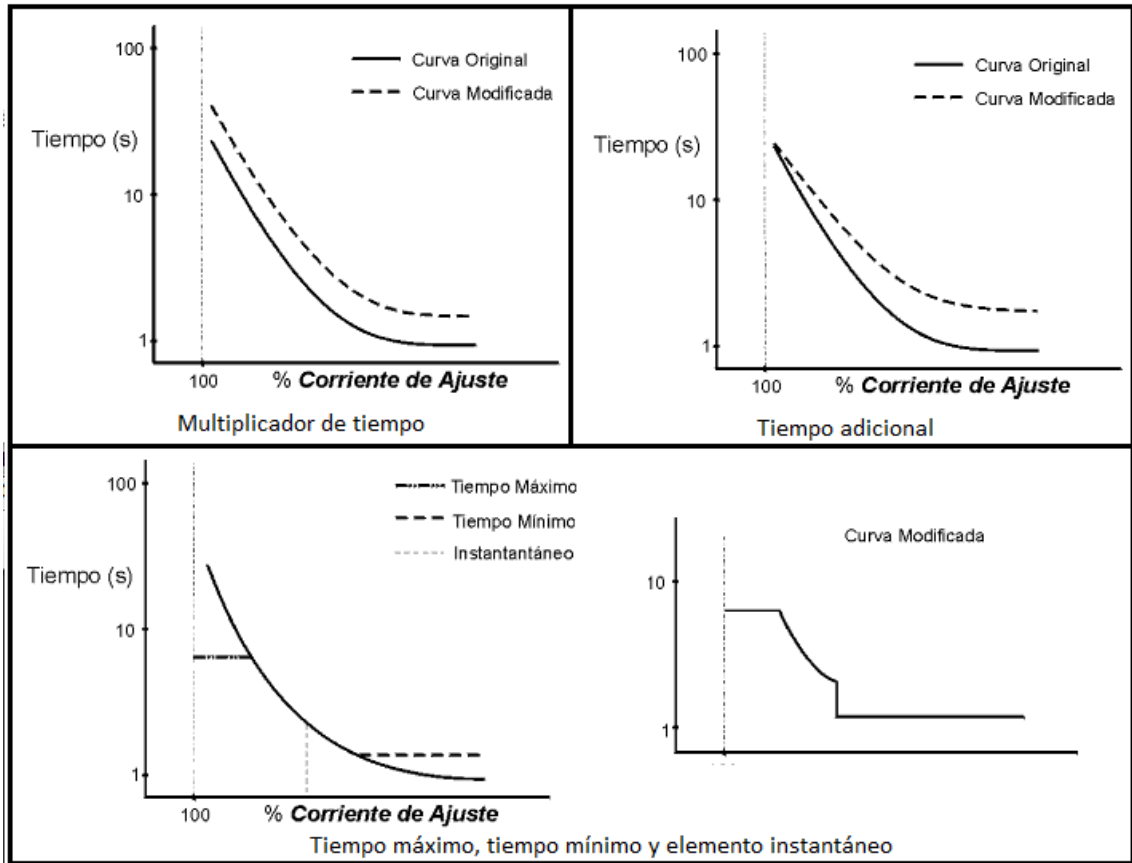
**Figura 3.6** Curvas de corriente-tiempo ANSI

Además de las curvas de corriente-tiempo, en la protección de sobrecorriente de tiempo inverso, se utilizan parámetros para modificar las curvas, y por ende, el comportamiento de los dispositivos ante una falla. Estos modificadores son:

- Dial o multiplicador de tiempo: este parámetro define un valor que multiplica al tiempo de disparo.
- Tiempo adicional: determina un valor de tiempo que se suma al tiempo de disparo de la curva de corriente-tiempo.
- Elemento de disparo instantáneo: este parámetro provoca un disparo del reconectador si la corriente de línea supera un múltiplo de la corriente de disparo.
- Tiempo mínimo y máximo: estos parámetros se utilizan para definir el tiempo mínimo para producir un disparo, mientras que el tiempo máximo define el tiempo máximo para un disparo si se excede el límite de tiempo prefijado.

- Multiplicador del umbral: se utiliza para evitar un disparo si la corriente de línea está por debajo del umbral de corriente. El umbral de corriente es el ajuste de corriente multiplicado por el multiplicador del umbral.

En la figura 3.7 se muestra el efecto de los modificadores en las curvas de corriente-tiempo. [5]



**Figura 3.7** Efecto de los modificadores sobre las curvas de corriente-tiempo [5]

- **Corriente de disparo**

La corriente de disparo es el parámetro que define el inicio de la temporización en el gabinete de control para la apertura del interruptor de potencia.

## **2) Protección de tiempo definido**

Esta protección es una alternativa a la protección de tiempo inverso, lo que hace es activar el interruptor de potencia en un tiempo fijo programado luego de que se detecte una falla.

## **3) Protección de tierra de alta sensibilidad (SEF)**

Esta protección provoca que se dispare el interruptor de potencia cuando la corriente de tierra se eleve por sobre el valor predeterminado por un tiempo mayor al lapso prefijado para esta protección. Esta protección aplica en sistemas con las cargas conectadas entre fases, y además no circula corriente por el neutro.

## **4) Protección por pérdida de fase**

En la protección por pérdida de fase, se abrirá el interruptor de potencia si la tensión de fase a tierra de una o dos fases disminuye a un valor menor que un voltaje prefijado durante un tiempo mayor a un lapso prefijado.

## **5) Protección de sobrevoltaje y bajo voltaje**

Esta protección toma mediciones de voltaje periódicamente, las compara con los umbrales derivados del voltaje nominal del sistema y, en conjunto con ciertas configuraciones de protecciones de voltaje determina si estas mediciones mantienen un estado nominal. Una configuración flexible de voltaje usando una evaluación lógica tipo AND, OR o PROMEDIO del voltaje fuente se utiliza para detectar cuando los voltajes medidos se desvían del estado normal, y generan el disparo del interruptor de potencia por sobrevoltaje, o bajo voltaje.

## **6) Protección de sobrefrecuencia y baja frecuencia**

La frecuencia del sistema se censa por medio de los cruces por cero sucesivos del voltaje de fase a tierra de una de las terminales del reconectador. Cuando la frecuencia medida iguala o excede los valores umbral de sobre y baja

frecuencia, se inicia el conteo de un lapso de tiempo prefijado para el disparo del interruptor de potencia. De continuar la condición de sobrefrecuencia o baja frecuencia, se da la apertura del interruptor de potencia.

## **7) Protección direccional**

La protección direccional es una protección opcional que restringe los disparos para faltas en un lado designado del reconectador, esto es, conociendo la dirección del flujo de la corriente; previniendo aperturas innecesarias por fallas en dirección hacia la fuente, y realizando aperturas para fallas en dirección a la carga únicamente.

## **8) Bloqueo por carga viva**

Si se activa esta protección, todas las solicitudes de cerrar los contactos del interruptor de potencia serán desatendidas si cualquiera de las terminales del lado de la carga se encuentra energizada.

## **9) Restrictor de corrientes inrush**

Al cerrar el interruptor sobre una carga típica siempre se da una corta corriente inrush causada por las corrientes de magnetización de los transformadores, y/o baja resistencia de filamentos de lámparas y motores arrancando. El propósito de esta protección es prevenir un disparo del reconectador cuando ocurren corrientes inrush. Entonces esta protección opera elevando los umbrales de corriente de las fases y de tierra durante un periodo corto de tiempo para permitir el flujo de las corrientes inrush. Los umbrales y el lapso de tiempo para esta protección se configuran en el control del reconectador.

### **3.3.3 Datos técnicos de los reconectadores del circuito Cerrillos**

La empresa JASEC emplea en el circuito Cerrillos dispositivos de protección de las marcas ABB, Nu-Lec y Cooper. Específicamente se utiliza los controles ABB modelo DPU2000R, Cooper modelos Form5 y Form6, y Nu-Lec modelo N38. En



cuanto a interruptores de potencia, con los controles ABB se utiliza interruptores Alstom modelo GL107, con los controles Cooper se utiliza interruptores Cooper modelo VWVE38X, y para los controles Nu-Lec se utiliza interruptores Nu-Lec modelo N38. Es importante conocer las especificaciones de los dispositivos, tanto de los controles como de los interruptores, para saber si resisten las condiciones de la red, así como para saber las posibilidades que presentan a la hora de configurarlos para lograr un funcionamiento coordinado entre ellos. En la tabla 3.2 se muestra el rango de valores relacionados con la protección de corriente inversa que es posible configurar en los distintos controles.

**Tabla 3.2** Valores configurables en los gabinetes de control relacionados con la protección de tiempo inverso

| Control<br>Parámetro               | ABB<br>DPU2000R | Cooper<br>Form5 | Cooper<br>Form6 | Nu-Lec<br>N38 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Corriente de disparo de fase (A)   | 1 – 12*         | 10 - 1600       | 10 - 1600       | 10 - 1260     |
| Corriente de disparo de tierra (A) | 1 – 12*         | 5 - 800         | 5 - 800         | 10 – 1260     |
| Multiplicador de tiempo o Dial     | 1 – 10          | 0,1 - 2         | 0,1 - 25        | 0,05 – 2      |
| Tiempo adicional (s)               | -               | 0,01 – 0,2      | 0 - 30          | 0 - 2         |
| Tiempo de recierre (s)             | 0,1 - 200       | 0,3 - 1000      | 0,3 - 1000      | 0,5 – 180     |
| Reinicio de secuencia (s)          | 3 - 200         | 3 - 1800        | 3 - 1800        | 5 - 180       |
| Tiempo mínimo de disparo (s)       | -               | 0,013 - 1       | 0,01 - 1        | 0 - 2         |

\*Valor a multiplicar por la relación de vueltas del transformador de corriente de fase.

Ahora para los interruptores de potencia, la tabla 3.3 muestra valores de tolerancia de los equipos, así como tiempos máximos a la hora de operar.

**Tabla 3.3** Tolerancia y tiempos máximos para los interruptores de potencia

| Interruptor<br>Parámetro         | Alstom<br>GL107 | Cooper<br>VWVE38X | Nu-Lec<br>N38 |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| Voltaje nominal (kV)             | 36              | 34,5              | 38            |
| Corriente nominal (A)            | 1600            | 560               | 630           |
| $I_{CC}$ simétrica nominal (kA)  | 25              | 12                | 12,5          |
| $I_{CC}$ asimétrica nominal (kA) | 62.5            | 18,3              | 19,2          |
| Tiempo de apertura (ms)          | 35              | -                 | 50            |
| Tiempo para interrupción (ms)    | 50              | 45                | 60            |
| Tiempo de cierre (ms)            | 75              | -                 | 100           |

## **Capítulo 4: Procedimiento metodológico**

El procedimiento metodológico consiste en las distintas actividades y el orden en que se realizaron con el fin de cumplir con los objetivos del proyecto.

### **4.1 Investigación bibliográfica**

La investigación bibliográfica fue la principal fuente de información para formar el marco teórico del proyecto, esto es, conocer las principales características de funcionamiento de una red eléctrica, de los dispositivos de seguridad involucrados, así como los métodos aplicables en la coordinación de protecciones. Dentro de las principales características de los equipos de protección, están las tolerancias de los interruptores de potencia, tiempos de reacción, los tipos de protección ofrecidas por los distintos controles, además de los parámetros configurables para la operación de estas protecciones.

Para la obtención de la información, se visitó la biblioteca José Figueres Ferrer del Instituto Tecnológico de Costa Rica para la búsqueda y consulta de libros relacionados con las redes de distribución, cálculo de corrientes de cortocircuito y la coordinación de protecciones. También se adquirió manuales técnicos de los dispositivos de protección empleados por parte de la empresa JASEC en el circuito Cerrillos, estos manuales se encuentran disponibles en versión digital en Internet, además de algunos brindados por la empresa.

La principal importancia de esta actividad consistió en formar criterios para saber qué información de la red y los dispositivos empleados es necesaria para poder analizar el comportamiento actual de la red, y luego para determinar qué aspectos es necesario modificar para conseguir el comportamiento deseado por parte de la red.

### **4.2 Obtención de datos de configuración de los reconectadores**

Para obtener los datos de configuración de los reconectadores lo primero que se hizo fue revisar los manuales de cada reconectador, para conocer el

funcionamiento del software que cada fabricante ofrece para la comunicación del reconectador con una PC, además de revisar documentación disponible en la empresa acerca de la utilización de estas aplicaciones. Este software permite la configuración de las protecciones de los dispositivos, además permite bajar a la PC los parámetros configurados en el reconectador para su posterior análisis. Específicamente estos programas son WinECP para los reconectores marca ABB, ProView para los marca Cooper, y WSOS para los Nu-Lec.

Una vez revisada esta documentación, con ayuda del personal de la empresa se procedió a realizar pruebas de conexión con distintos reconectores del patio de interruptores Norte y Virtual, esto con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del software y los cables de comunicación.

Luego de corroborar el procedimiento y el funcionamiento del equipo para la descarga de la configuración de los reconectores, con ayuda de personal de la empresa se procedió a desplazarse hacia las distintas locaciones en donde se ubica cada reconector, recorriendo el circuito Cerrillos en su totalidad.

#### **4.3 Medición de corrientes de línea del circuito Cerrillos**

Esta medición de corrientes se realizó con ayuda del sistema SCADA que posee la empresa, y se llevó a cabo con el fin de conocer el comportamiento de la red en cuanto a demanda de energía por parte de los clientes y conocer los valores máximos de corriente que circulan por la red. Se midió valores de corriente durante el día, varios días, para así obtener un aproximado de la demanda de energía dependiendo de la hora del día.

Una vez determinado el periodo del día de mayor demanda de energía, se procedió a recorrer el circuito para tomar las mediciones de corrientes para cada reconector, procurando estar dentro de este periodo de mayor demanda. De igual manera que con las corrientes del circuito, estas mediciones se realizaron varias veces, en distintos días de la semana.

La importancia de esta etapa consistió en conocer los niveles de corriente a considerar como normales para los distintos ramales del circuito, así como los cambios que se puedan presentar al cerrar los distintos reconectores de enlace, de manera que al configurar los equipos de protección éstos puedan detectar y aislar fallas de manera eficiente si es que se presentaran.

#### **4.4 Uso del paquete computacional ETAP**

ETAP es un poderoso software computacional que incluye múltiples funciones para el diseño y simulación de redes eléctricas de potencia. Lo primero que se hizo previo a la utilización del software fue obtener y revisar manuales de usuario disponibles en formato digital en Internet, además de revisar el archivo de ayuda que brinda el programa. Además, disponibles en la página de Internet de los desarrolladores del software se encuentran distintas prácticas para aprender a utilizar distintas herramientas del software.

Luego de realizar las prácticas, se procedió a utilizar el software para el desarrollo del proyecto. Entonces se adquirió y revisó un diagrama unifilar de la red eléctrica del cual disponía JASEC. Se revisó que la topografía del circuito concordara con la actual del circuito, comprobada a la hora de realizar el recorrido por la red, y también con ayuda de personal de la empresa. Después de comprobar la topografía, se procedió a actualizar el diagrama con los datos de marca, modelo y configuración actuales de los reconectores del circuito Cerrillos.

En este punto es en donde se aprovechó las herramientas que ofrece el software. Primero se realizó la simulación de fallas en distintos puntos de la red para obtener las corrientes de cortocircuito en el punto de localización de cada reconector. Luego de esto, utilizando la herramienta STAR se corrió una simulación de coordinación de los equipos de protección, esto con el fin de conocer la respuesta actual de la red ante posibles fallas, y utilizar los resultados de esta simulación para determinar cuáles dispositivos requieren una modificación en su configuración para lograr el funcionamiento coordinado deseado.

Ahora, con los datos de configuración y corrientes obtenidos anteriormente, y el software se obtuvo los nuevos valores de configuración para los reconectores, y finalmente se introdujeron los nuevos datos de configuración en el programa para realizar otra simulación, en este caso con el fin de comprobar el funcionamiento coordinado de las protecciones utilizando los nuevos parámetros propuestos.

El software ETAP constituyó la principal herramienta para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, ya que facilitó significativamente el análisis del comportamiento de la red y la verificación del cumplimiento de los objetivos del proyecto.

#### **4.5 Redacción de documentación**

Luego de obtener y verificar los parámetros a configurar en los distintos reconectores del circuito Cerrillos, se procedió a documentar los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, así como los resultados de las mediciones realizadas que justifican las bases para la deducción de los nuevos parámetros a configurar, además se muestra los resultados de las simulaciones que comprueban el cumplimiento de los objetivos del proyecto, y por lo tanto el funcionamiento coordinado de las protecciones del circuito Cerrillos.

## **Capítulo 5: Estado actual de los sistemas de protección y mediciones experimentales**

### **5.1 Red de distribución eléctrica de la empresa JASEC**

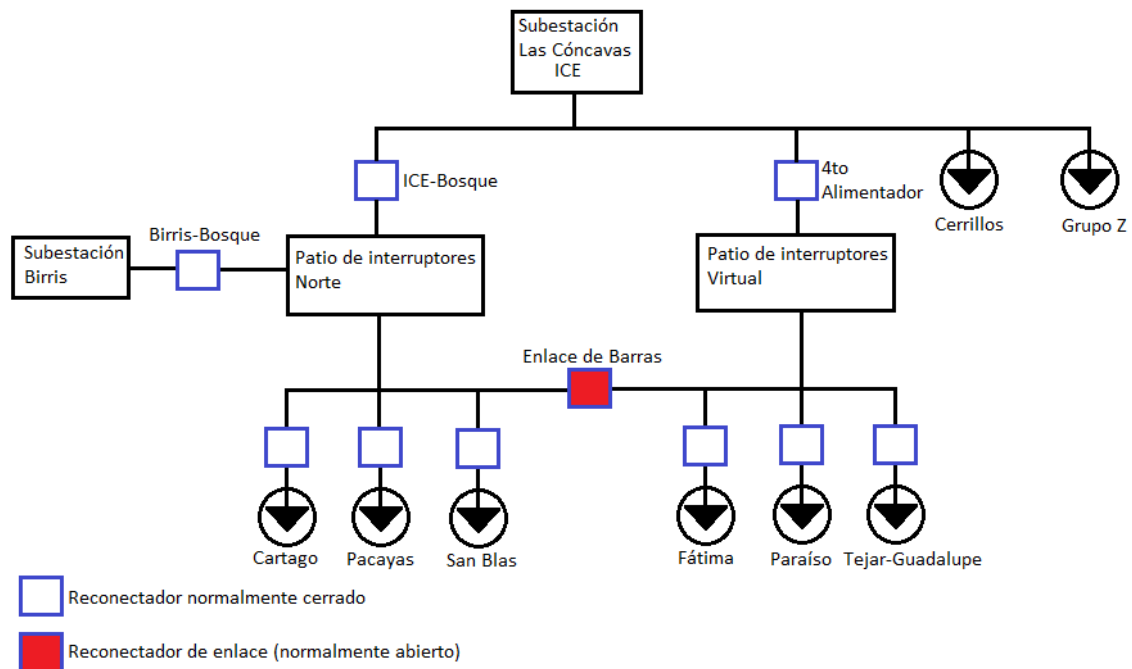
La red de distribución de energía eléctrica de la empresa JASEC utiliza un voltaje de 34,5kV y se encuentra dividida en nueve circuitos que son Cartago, Cerrillos, Fátima, La Flor, Grupo Zeta, Pacayas, Paraíso, San Blas y Tejar-Guadalupe. La razón de utilizar un voltaje de 34,5kV es que el efecto de las caídas de tensión en las líneas de transmisión en largas distancias no es muy significativo comparado con voltajes de transmisión menores. Además existen subestaciones dentro de la red que reducen el voltaje de operación de 34,5kV a 13,8kV.

Al dividir la red de distribución en circuitos se facilita el mantenimiento y la operación de la misma. Al tener cada circuito su propia fuente de energía y sus dispositivos de protección, se tienen múltiples opciones para mantener funcionando la red a la hora de reparar una falla o realizar maniobras de mantenimiento afectando a la menor cantidad de usuarios posibles.

Sin embargo, estos circuitos no se encuentran completamente aislados, sino que se encuentran conectados entre sí por medio de reconectores de enlace, que en caso de presentarse una falla en alguna sección de un circuito permiten que otro circuito le provea la energía para poder reparar la falla y que el resto del circuito que no se ve directamente afectado pueda continuar con energía. Estos reconectores de enlace se encuentran normalmente abiertos.

Mediante el uso de varias fuentes de potencia, los sistemas de protección y los reconectores de enlace la empresa JASEC consigue brindar la confiabilidad, selectividad y estabilidad en el servicio que brinda, satisfaciendo a sus clientes y cumpliendo con exigencias por parte de entidades gubernamentales para poder brindar el servicio.

En la figura 5.1 se muestra el diagrama de conexión de las subestaciones suplidoras de potencia Las Cónccavas y Birris con las subestaciones de distribución de energía a los distintos circuitos.



**Figura 5.1** Diagrama de conexión de las subestaciones

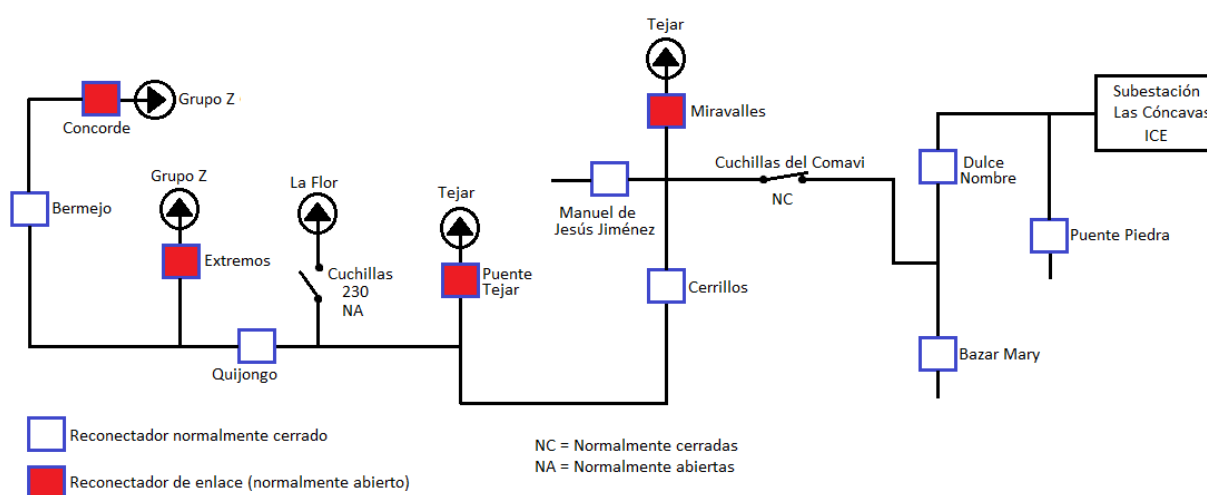
## 5.2 El circuito Cerrillos

El circuito Cerrillos se encuentra al sur de la ciudad de Cartago. Este circuito distribuye la energía en lugares como Dulce Nombre, Aguacaliente, Cocorí, parte de Tejar del Guarco, algunos sectores del Parque Industrial, y Quebradilla de Cartago. La energía para este circuito proviene de la subestación Las Cónccavas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), y tiene posibilidad de enlace con los circuitos Tejar-Guadalupe, Grupo Z y La Flor, y por lo tanto puede recibir energía por parte de cualquiera de estos circuitos, o proporcionarla según sea necesario, esto mediante los re conectadores de enlace, o las Cuchillas 230 para el caso del enlace con el circuito La Flor.



Cerrillos cuenta con un total de siete reconectadores que operan normalmente cerrados, y cuatro reconectadores de enlace que se encargan de las interconexiones con los circuitos aledaños. Además de estos reconectadores, el circuito Cerrillos cuenta con interruptores que conectan a este circuito con el circuito La Flor. Tanto los reconectadores de enlace como los interruptores se utilizan en maniobras específicas, y se encuentran abiertos durante el funcionamiento normal de la red. El reconectador Dulce Nombre no se encuentra instalado aún, pero se tomó en cuenta en la propuesta de coordinación para que esta no se vea afectada al incluir el nuevo dispositivo.

En la figura 5.2 se muestra el diagrama del circuito Cerrillos, indicando las conexiones entre los reconectadores y las interconexiones con los circuitos aledaños.



**Figura 5.2** Diagrama de conexión de los reconectadores del circuito Cerrillos

Los ingenieros de la empresa JASEC definieron el esquema de operación de los dispositivos de protección basándose en criterios técnicos. Actualmente los reconectadores se encuentran configurados con dos alternativas de protección, una para la operación normal de la red y otra para cubrir los efectos de la carga fría. La selección de la alternativa de protección vigente se realiza en el gabinete de control de cada reconectador de manera manual.

El efecto de carga fría se da cuando un circuito ha estado sin energía por un periodo largo de tiempo y esta es restablecida, entonces en este momento se va a dar una mayor demanda de energía que la requerida durante la operación normal de la red. Este incremento en la demanda, que dura un cierto tiempo, se puede deber a factores como el tipo de carga conectada al circuito, la hora en que se restablezca la energía, el tiempo que se estuvo sin alimentación, entre otros. La alternativa utilizada para los efectos de carga fría utiliza un único recierre del interruptor de potencia luego de aislar una falla y se utiliza además la protección de tiempo inverso con una curva lenta, para evitar así la falsa detección de una falla y un posible disparo en el reconectador. Una vez que los niveles de corriente regresan a su estado normal de funcionamiento, se escoge en cada reconectador la otra alternativa.

La alternativa normal de operación utiliza tres recierres. Para la primera operación de la protección de tiempo inverso se utiliza una curva rápida, y para las siguientes dos operaciones se utiliza una curva lenta. La razón de utilizar primero una curva rápida y luego una lenta radica en que la curva rápida despejará la falla en un tiempo corto, y de presentarse una falla transitoria, si se empleara de nuevo una curva rápida, se podría dar otro disparo, y de darse un tercer disparo el reconectador entraría en bloqueo y requeriría un recierre manual. Utilizando curvas lentas para los últimos dos disparos se previene esta situación. En cuanto al tiempo para recierre, se utiliza tiempos de 10 y 5 segundos, estos para áreas rurales y urbanas respectivamente. Específicamente, la curva rápida utilizada por la empresa es la Kyle 101, y la curva lenta es la Kyle 118, y se utilizan sin modificadores de curvas.

Las corrientes de disparo de los reconectadores se definen según el valor más alto de demanda en la zona en que se encuentre el reconectador, incluyendo los casos en que el circuito debe alimentar a otro circuito por medio de reconectadores de enlace, en donde la demanda de potencia adicional se deduce a partir del consumo en funcionamiento normal del circuito a alimentar.

### 5.3 Configuración actual de las protecciones de los reconectadores

En esta sección se exponen los parámetros configurados actualmente en los reconectadores del circuito Cerrillos. Se da mayor importancia a la protección de sobrecorriente de tiempo inverso debido a que es la utilizada para lograr un funcionamiento coordinado entre los dispositivos de protección. En la tabla 5.1 se muestra los valores configurados en los reconectadores para la protección de tiempo inverso.

**Tabla 5.1** Configuración actual de la protección de tiempo inverso en los reconectadores del circuito Cerrillos

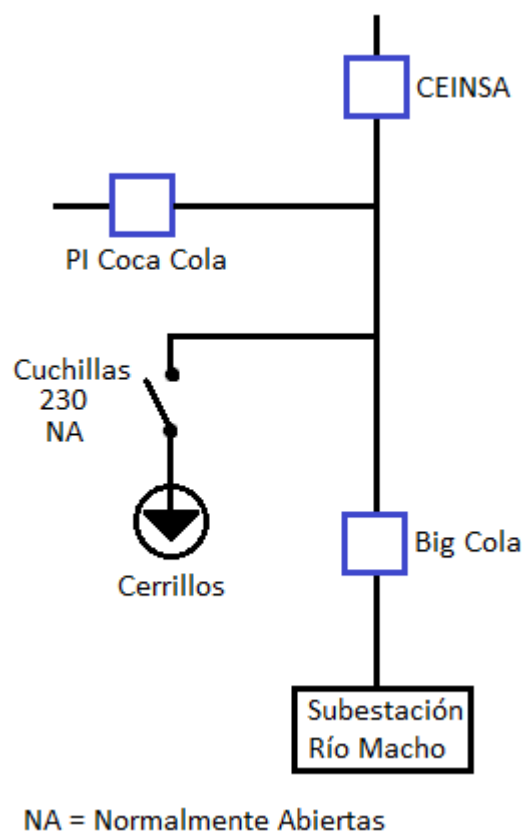
| Reconectador            | Marca  | $I_{disparo}$<br>(A) | Curva corriente-tiempo |            |            | Núm<br>recierres | $t_{recierre}$ (s) |    |    | Reinicio de<br>secuencia<br>(s) |
|-------------------------|--------|----------------------|------------------------|------------|------------|------------------|--------------------|----|----|---------------------------------|
|                         |        |                      | 1                      | 2          | 3          |                  |                    |    |    |                                 |
| Bazar Mary              | Cooper | 290                  | 101                    | 118        | 118        | 3                | 5                  | 5  | 5  | 30                              |
| Bermejo                 | Cooper | 150                  | 101                    | 118        | 118        | 3                | 5                  | 5  | 5  | 60                              |
| Cerrillos               | Nu-Lec | 500                  | Ext<br>Inv             | Ext<br>Inv | -          | 2                | 10                 | 10 | 10 | 30                              |
| Concorde*               | Nu-Lec | 200                  | Ext<br>Inv             | Ext<br>Inv | Ext<br>Inv | 4                | 1                  | 1  | 1  | 30                              |
| Extremos*               | Cooper | 150                  | 101                    | 118        | 118        | 3                | 5                  | 5  | 10 | 30                              |
| Manuel Jesús<br>Jiménez | Nu-Lec | 250                  | 101                    | 118        | 118        | 3                | 10                 | 10 | 10 | 30                              |
| Miravalles*             | Nu-Lec | 500                  | Ext<br>Inv             | Ext<br>Inv | -          | 2                | 10                 | 10 | 10 | 30                              |
| Puente<br>Piedra        | Cooper | 290                  | 101                    | 118        | 118        | 3                | 10                 | 10 | 10 | 60                              |
| Quijongo                | ABB    | 120                  | Ext<br>Inv             | Ext<br>Inv | -          | 2                | 5                  | 5  | -  | 60                              |

\*Reconectador de enlace.

Además de la protección de tiempo inverso, el reconectador Cerrillos tiene activadas la protección de bloqueo de alta corriente y la protección de corrientes inrush.

## 5.4 El circuito La Flor

Si bien el circuito La Flor no forma parte del estudio de coordinación de protecciones de este proyecto, los reconectores del mismo se deben de tomar en cuenta debido a que al cerrar los interruptores Cuchillas 230 éstos interactúan con los reconectores del circuito Cerrillos, debiendo mantener el comportamiento coordinado buscado. Debido a esto, a continuación la figura 5.3 muestra el diagrama de conexión de los reconectores del circuito La Flor.



**Figura 5.3** Diagrama de conexión de los reconectores del circuito La Flor

El circuito La Flor recibe su energía de la subestación Río Macho del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y suministra energía eléctrica a parte del Parque Industrial de Cartago y otros sectores. Así mismo, a continuación se presenta en la

tabla 5.2 los parámetros configurados actualmente en los reconectores del circuito la Flor.

**Tabla 5.2** Configuración actual de la protección de tiempo inverso en los reconectores del circuito La Flor

| Reconector   | Marca  | $I_{disparo}$<br>(A) | Curva corriente-tiempo |     |     | Num<br>recierres | $t_{recierre}$ (s) |   |   | Reinicio de<br>secuencia<br>(s) |
|--------------|--------|----------------------|------------------------|-----|-----|------------------|--------------------|---|---|---------------------------------|
|              |        |                      | 1                      | 2   | 3   |                  |                    |   |   |                                 |
| Big Cola     | Nu-Lec | 400                  | 118                    | 118 | Inv | 2                | 5                  | 5 | 5 | 30                              |
| CEINSA       | Nu-Lec | 320                  | 118                    | 118 | Inv | 2                | 5                  | 5 | 5 | 30                              |
| PI Coca Cola | Cooper | 250                  | 118                    | 118 | -   | 2                | 2                  | 2 | 5 | 60                              |

Además, el reconector Big Cola tiene activada la protección por pérdida de fase.

## 5.5 Corrientes de línea de los circuitos

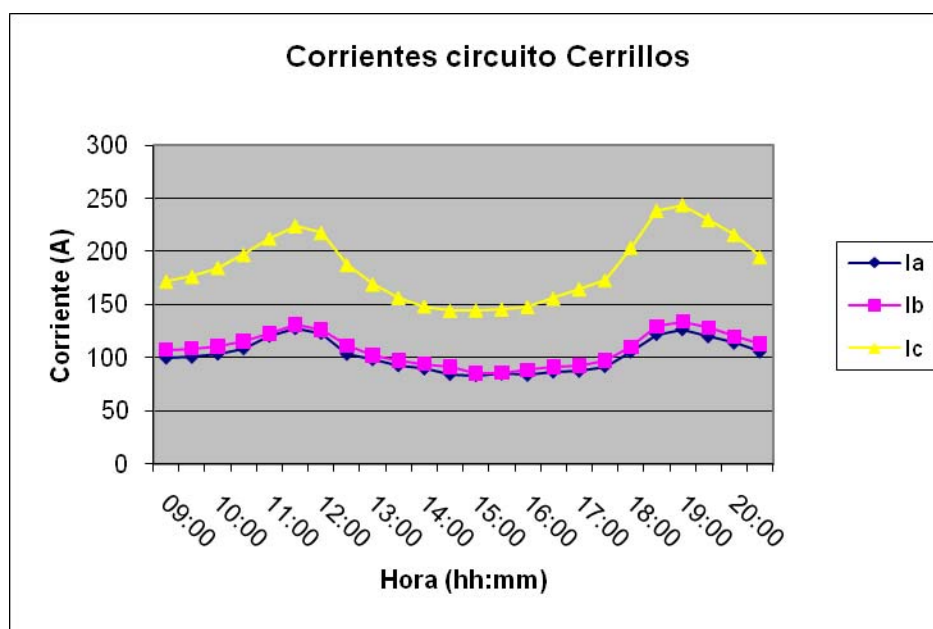
Se tomó muestras de las corrientes de línea de los diferentes circuitos implicados con este proyecto. Las mediciones se realizaron con ayuda del sistema SCADA del centro de control de El Bosque de la empresa. Las mediciones se tomaron desde las 9:00 am hasta las 8:30 pm cada 30 minutos, esto durante 10 días no consecutivos. Esto con el fin de analizar su comportamiento, identificar los momentos de mayor consumo de potencia y los valores máximos de corriente que se presentan.

Con las mediciones realizadas se llevó a cabo un análisis estadístico para obtener los valores promedio de las corrientes de fase, y el coeficiente de variación de las muestras para la validación de los valores medidos. En la tabla 5.3 se muestra los valores promedio de las corrientes de fase del circuito Cerrillos.

**Tabla 5.3** Valores promedio de las corrientes de fase del circuito Cerrillos

| Hora  | $I_A$ (A) | CV (%) | $I_B$ (A) | CV (%) | $I_C$ (A) | CV (%) |
|-------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 9:00  | 100       | 1,79   | 108       | 2,33   | 172       | 2,47   |
| 10:00 | 103       | 3,24   | 111       | 2,06   | 185       | 2,69   |
| 11:00 | 120       | 3,64   | 123       | 3,57   | 212       | 2,71   |
| 11:30 | 127       | 2,85   | 131       | 4,003  | 224       | 1,93   |
| 12:00 | 123       | 4,48   | 126       | 4,86   | 217       | 4,47   |
| 13:00 | 98        | 4,34   | 102       | 4,28   | 169       | 4,04   |
| 14:00 | 89        | 4,03   | 94        | 3,85   | 148       | 3,45   |
| 15:00 | 83        | 1,56   | 85        | 2,04   | 145       | 2,31   |
| 16:00 | 83        | 4,83   | 88        | 3,04   | 148       | 1,72   |
| 17:00 | 87        | 3,28   | 92        | 2,47   | 165       | 1,98   |
| 18:00 | 105       | 4,76   | 110       | 4,22   | 204       | 4,73   |
| 18:30 | 122       | 3,38   | 130       | 3,84   | 238       | 3,72   |
| 19:00 | 126       | 2,13   | 134       | 1,58   | 244       | 2,88   |
| 20:00 | 114       | 1,69   | 120       | 2,31   | 216       | 2,43   |

En la figura 5.4 se muestra una gráfica del comportamiento de las corrientes de fase del circuito Cerrillos. Esta gráfica corresponde a los datos de la tabla 5.3.



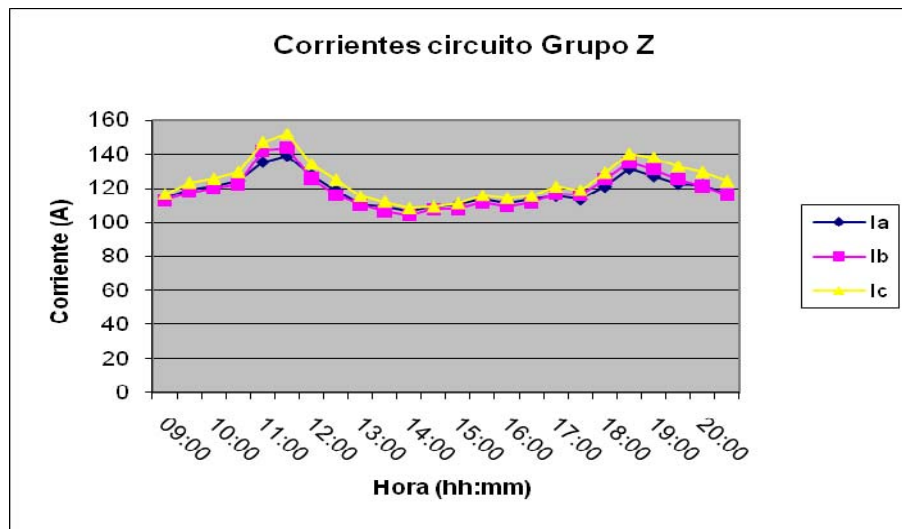
**Figura 5.4** Comportamiento de las corrientes de fase del circuito Cerrillos

En la tabla 5.4 se muestra el valor promedio de las corrientes de fase para el circuito Grupo Z.

**Tabla 5.4** Valores promedio de las corrientes de fase del circuito Grupo Z

| Hora  | $I_A$ (A) | CV (%) | $I_B$ (A) | CV (%) | $I_C$ (A) | CV (%) |
|-------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 9:00  | 114       | 4,55   | 113       | 1,11   | 117       | 2,14   |
| 10:00 | 121       | 4,41   | 120       | 4,11   | 126       | 4,55   |
| 11:00 | 135       | 3,63   | 142       | 3,58   | 147       | 3,46   |
| 11:30 | 139       | 3,55   | 144       | 2,55   | 152       | 2,81   |
| 12:00 | 128       | 3,02   | 126       | 2,83   | 134       | 1,86   |
| 13:00 | 110       | 2,79   | 110       | 4,93   | 115       | 2,55   |
| 14:00 | 107       | 3,06   | 104       | 4,31   | 108       | 2,18   |
| 15:00 | 110       | 3,22   | 108       | 4,63   | 111       | 3,47   |
| 16:00 | 111       | 3,15   | 110       | 4,15   | 114       | 3,11   |
| 17:00 | 115       | 2,31   | 117       | 3,11   | 121       | 4,74   |
| 18:00 | 121       | 3,85   | 125       | 4,42   | 129       | 3,29   |
| 18:30 | 131       | 4,85   | 135       | 2,81   | 140       | 3,96   |
| 19:00 | 127       | 4,38   | 131       | 2,85   | 138       | 3,57   |
| 20:00 | 122       | 3,11   | 121       | 4,86   | 130       | 4,13   |

Las corrientes de fase del circuito Grupo Z de la tabla 5.4 se grafican a continuación en la figura 5.5.



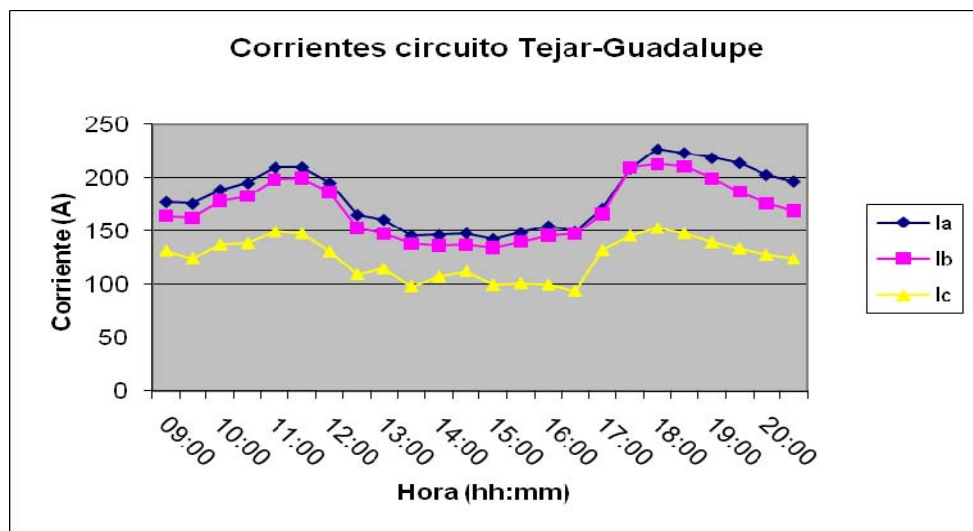
**Figura 5.5** Comportamiento de las corrientes de fase del circuito Grupo Z

Ahora en la tabla 5.5 se presentan los valores de corrientes de fase promedio del circuito Tejar-Guadalupe.

**Tabla 5.5** Valores promedio de las corrientes de fase del circuito Tejar-Guadalupe

| Hora  | $I_A$ (A) | CV (%) | $I_B$ (A) | CV (%) | $I_C$ (A) | CV (%) |
|-------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 9:00  | 178       | 2,41   | 165       | 1,12   | 132       | 3,54   |
| 10:00 | 189       | 3,13   | 178       | 2,53   | 137       | 3,23   |
| 11:00 | 210       | 4,25   | 198       | 4,57   | 150       | 4,56   |
| 11:30 | 210       | 2,32   | 200       | 2,34   | 148       | 2,87   |
| 12:00 | 195       | 2,65   | 186       | 2,11   | 131       | 1,75   |
| 13:00 | 161       | 3,35   | 148       | 1,86   | 115       | 2,18   |
| 14:00 | 146       | 2,97   | 137       | 2,18   | 107       | 1,89   |
| 15:00 | 143       | 3,35   | 134       | 3,53   | 100       | 2,96   |
| 16:00 | 155       | 3,79   | 146       | 2,93   | 100       | 2,35   |
| 17:00 | 171       | 2,75   | 166       | 2,56   | 132       | 3,54   |
| 18:00 | 227       | 1,53   | 213       | 1,98   | 153       | 1,79   |
| 18:30 | 224       | 1,89   | 211       | 2,24   | 148       | 1,45   |
| 19:00 | 219       | 3,26   | 199       | 2,45   | 139       | 2,35   |
| 20:00 | 203       | 2,01   | 176       | 3,45   | 128       | 2,54   |

La figura 5.6 muestra el comportamiento de las corrientes de fase del circuito Tejar-Guadalupe.



**Figura 5.6** Comportamiento de las corrientes de fase del circuito Tejar-Guadalupe

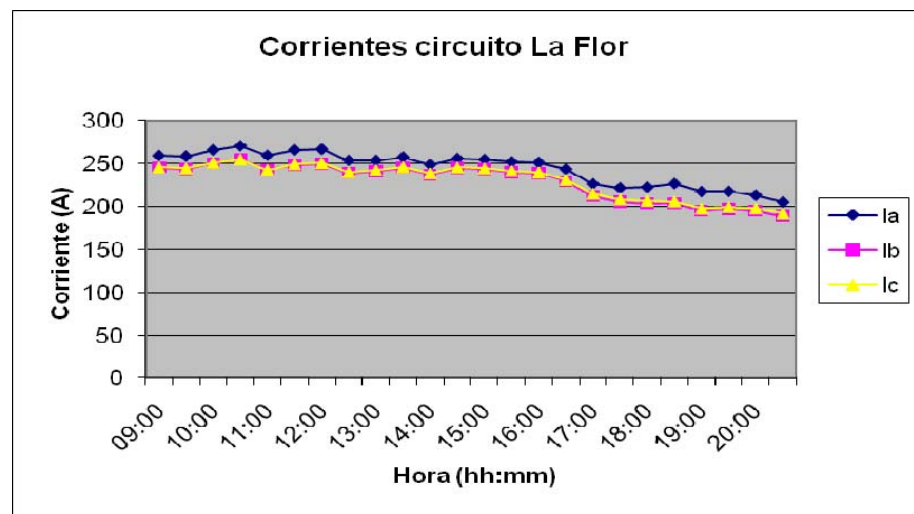


Finalmente en la tabla 5.6 se muestra los valores promedio de las corrientes de fase del circuito La Flor.

**Tabla 5.6** Valores promedio de las corrientes de fase del circuito La Flor

| Hora  | $I_A$ (A) | CV (%) | $I_B$ (A) | CV (%) | $I_C$ (A) | CV (%) |
|-------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 9:00  | 259       | 1,2    | 245       | 1,27   | 245       | 1,15   |
| 10:00 | 266       | 2,01   | 250       | 2,24   | 251       | 2,31   |
| 11:00 | 259       | 4,66   | 243       | 3,63   | 243       | 4,94   |
| 11:30 | 266       | 2,07   | 248       | 2,39   | 249       | 2,55   |
| 12:00 | 267       | 2,38   | 249       | 3,26   | 250       | 3,17   |
| 13:00 | 253       | 1,06   | 241       | 1,19   | 242       | 0,89   |
| 14:00 | 249       | 3,51   | 237       | 3,85   | 238       | 3,62   |
| 15:00 | 254       | 3,77   | 243       | 3,68   | 244       | 3,97   |
| 16:00 | 251       | 2,71   | 238       | 3,14   | 239       | 2,73   |
| 17:00 | 226       | 0,69   | 212       | 1,12   | 215       | 0,89   |
| 18:00 | 222       | 4,15   | 203       | 3,91   | 207       | 4,47   |
| 18:30 | 226       | 4,21   | 204       | 4,59   | 206       | 4,19   |
| 19:00 | 217       | 2,13   | 195       | 3,47   | 198       | 3,68   |
| 20:00 | 213       | 1,07   | 195       | 1,11   | 198       | 1,49   |

En la figura 5.7 se muestra el comportamiento de las corrientes de fase del circuito La Flor cuyos valores provienen de la tabla 5.6.



**Figura 5.7** Comportamiento de las corrientes de fase del circuito La Flor

## 5.6 Corrientes máximas en los reconectadores

Las corrientes de línea de los circuitos mostradas en las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 corresponden al promedio de los valores registrados. En la tabla 5.7 se muestra los valores de corriente máximos registrados para cada circuito.

**Tabla 5.7** Valores máximos de corriente de línea de los circuitos

| Circuito  | Hora  | $I_A$<br>(A) | $I_B$<br>(A) | $I_C$<br>(A) | Hora  | $I_A$<br>(A) | $I_B$<br>(A) | $I_C$<br>(A) | Variación |           |           |
|-----------|-------|--------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|           |       |              |              |              |       |              |              |              | $I_A$ (%) | $I_B$ (%) | $I_C$ (%) |
| Cerrillos | 11:30 | 132          | 137          | 229          | 19:00 | 130          | 139          | 252          | -1,54     | 1,44      | 9,13      |
| Grupo Z   | 11:30 | 194          | 217          | 222          | 18:30 | 196          | 227          | 221          | 1,02      | 4,40      | -0,45     |
| Tejar     | 11:30 | 188          | 196          | 136          | 18:30 | 194          | 207          | 147          | 3,09      | 5,31      | 7,48      |
| La Flor   | 10:30 | 292          | 278          | 277          | 15:00 | 282          | 270          | 272          | -3,55     | -2,96     | -1,84     |

De las gráficas de comportamiento de las corrientes de fase en los diferentes circuitos, así como de la tabla de valores máximos se dedujo que los horarios de mayor demanda de energía se da entre las 10:30 a.m. y las 12:00 m.d., y las 6:00 p.m. y 7:00 p.m., por lo que entonces se procedió a recorrer los circuitos Cerrillos y La Flor tomando muestras de las corrientes de línea en los reconectadores dentro del lapso de tiempo de las 10:30 a.m. y 12:00 p.m. para procurar obtener valores máximos. Estas mediciones, al igual que las mediciones de corrientes de línea de los circuitos, se realizaron durante distintos días no consecutivos. En la tabla 5.8 se muestra los valores máximos de corriente medidos para cada reconectador.

**Tabla 5.8** Valores de corriente máximos medidos en los reconectadores de los circuitos Cerrillos y La Flor

| Reconectador  | Circuito  | $I_A$ (A) | $I_B$ (A) | $I_C$ (A) |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Bazar Mary    | Cerrillos | 30        | 23        | 19        |
| Bermejo       | Cerrillos | 3         | 4         | 1         |
| Big Cola      | La Flor   | 248       | 263       | 268       |
| CEINSA        | La Flor   | 221       | 227       | 228       |
| Cerrillos     | Cerrillos | 74        | 56        | 150       |
| Manuel J J    | Cerrillos | 22        | 27        | 19        |
| PI Coca Cola  | La Flor   | 72        | 70        | 71        |
| Puente Piedra | Cerrillos | 4         | 1         | 9         |
| Quijongo      | Cerrillos | 21        | 28        | 74        |

## 5.7 Corrientes de cortocircuito

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito se utilizó la herramienta STAR del software ETAP. Esta herramienta permite realizar estudios de cortocircuito según las normas ANSI e IEC. En el presente proyecto el estudio se realizó según la norma ANSI utilizando fallas trifásicas y fallas de fase, debido a que estos tipos de falla son los que producen los niveles más altos de corriente de cortocircuito. El diagrama unifilar de la red utilizado para realizar el estudio de cortocircuito fue proporcionado por un ingeniero de la empresa y fue realizado previo al inicio del presente proyecto. Este diagrama incluía los aportes de las cargas a la corriente de cortocircuito. Estos valores fueron estimados por los ingenieros de la empresa y fueron utilizados al realizar el estudio de cortocircuito.

La tabla 5.9 muestra a continuación los valores de corriente obtenidos para el estudio de cortocircuito llevado a cabo y corresponden a los valores de corriente en el punto de localización de cada reconectador.

**Tabla 5.9** Corrientes de cortocircuito para cada reconectador del circuito Cerrillos

| Reconectador  | I <sub>Falla trifásica</sub> (kA) |            | I <sub>Falla de fase</sub> (kA) |            |
|---------------|-----------------------------------|------------|---------------------------------|------------|
|               | Simétrica                         | Asimétrica | Simétrica                       | Asimétrica |
| Bazar Mary    | 8,215                             | 9,554      | 6,387                           | 7,342      |
| Bermejo       | 2,843                             | 3,023      | 1,816                           | 1,952      |
| Cerrillos     | 6,583                             | 7,398      | 4,801                           | 5,371      |
| Dulce Nombre  | 9,031                             | 10,716     | 7,270                           | 8,503      |
| Manuel J J    | 6,625                             | 7,451      | 4,837                           | 5,414      |
| Puente Piedra | 8,328                             | 9,708      | 6,489                           | 7,467      |
| Quijongo      | 3,905                             | 4,208      | 2,597                           | 2,820      |

## **Capítulo 6: Descripción del proceso de coordinación de protecciones**

### **6.1 Criterios utilizados para la definición de nuevos parámetros**

Como se mencionó anteriormente, el sistema actual de protección emplea ciertos criterios que son:

- Utilizar dos alternativas de protección, una para el funcionamiento normal de la red y otra para controlar los efectos de la carga fría.
- Se utiliza una curva rápida Kyle 101 en el primer disparo, y una curva lenta Kyle 118 para los últimos dos disparos en la alternativa de protección de funcionamiento normal.
- En la alternativa para la carga fría se emplea un único recierre y una curva lenta Kyle 118.
- No se utiliza modificadores para las curvas de corriente-tiempo.

Al comenzar a trabajar en la definición de los nuevos parámetros de configuración de la protección de sobrecorriente, además de tomar en cuenta los criterios utilizados actualmente, fue necesario considerar otros factores referentes a la operación de la red eléctrica como son los casos de mayor demanda de energía, los cambios en la topografía del circuito que se presentan al cerrar un reconectador de enlace, tanto para cuando el circuito Cerrillos se comporta como fuente como para cuando actúa como carga. Sin embargo, no fue posible lograr la coordinación de los dispositivos de protección con los criterios actuales, por lo que se realizó cambios en éstos. Fue necesario utilizar los modificadores de curvas, principalmente el multiplicador de tiempo o dial, y en algunos casos la adición de tiempo, esto para lograr el diferencial de tiempo entre curvas necesario para un comportamiento coordinado. También fue necesario utilizar un tipo distinto de curva para algunos casos.

En cuanto a la coordinación de protecciones, ésta solo aplica al primer disparo de los dispositivos, por lo que se propuso nuevos parámetros de configuración para el primer disparo únicamente, los criterios para el segundo y tercer disparo, así como para la alternativa de protección por carga fría se conservaron.

#### **6.1.2 Selección de la corriente de disparo**

Para la selección de la corriente de disparo de cada reconectador, los ingenieros de la empresa definieron un valor mínimo de 50A y un máximo de 550A, esto porque la tolerancia máxima de corriente por parte de los cables utilizados ronda los 600A. Además de esto, los ingenieros sugirieron un diferencial de corriente en la corriente de disparo entre dispositivos de 100A cuando fuera posible, sin embargo se presentó casos en los que la cantidad de dispositivos en cascada no permitían cumplir con este diferencial conservando los límites de 50A y 550A, por lo que se redujo el diferencial a 75A.

Una vez definidos los límites y el diferencial para la corriente de disparo, se procedió a definir el valor de ésta para cada uno de los dispositivos de protección. Para la selección de estos valores, se consideró un margen de seguridad de un 50% de la corriente de línea, es decir, se utilizó un valor mayor o igual al 150% de la corriente de línea en condiciones nominales de operación. Como se muestra en la tabla 5.7, la variación en las corrientes de línea de los circuitos se encuentra entre un 5% y un 9%, por lo que quedan dentro del margen de seguridad de 50% y una variación normal en la corriente no va a provocar un disparo innecesario.

#### **6.1.3 Selección del diferencial de tiempo entre las curvas de corriente-tiempo**

El diferencial de tiempo entre curvas se escogió basándose en criterios técnicos definidos por los ingenieros de la empresa. El principal criterio tomado en cuenta fue el tiempo que toma a un reconectador aislar una falla. En este caso, el dispositivo más lento en aislar una falla es el reconectador Nu-Lec N38, que requiere de 60ms para la interrupción de la corriente. Entonces, para dar un margen de

tiempo de seguridad se escogió un tiempo mayor o igual al doble del tiempo de interrupción del dispositivo más lento, o sea 120ms.

La principal razón de un diferencial de 120ms es que, de haberse escogido un valor cercano a los 60ms, es posible que un reconectador detecte una falla y provoque una apertura en el tiempo que toma al reconectador más cercano a la falla abrir sus contactos, provocando un área afectada mayor.

La separación de curvas por un diferencial de tiempo entre dispositivos en cascada es la principal forma de lograr un funcionamiento coordinado.

#### **6.1.4 Selección de las curvas de corriente-tiempo y los modificadores**

Como se mencionó anteriormente, dentro de los criterios actuales considerados por la empresa se encuentra emplear la curva rápida Kyle 101 en el primer disparo de los reconectadores, y no utilizar modificadores de curvas, pero no fue posible obtener un comportamiento coordinado.

Para cumplir con el diferencial de tiempo mínimo se recurrió al uso del modificador de multiplicador de tiempo o dial. Con ayuda de una aplicación para el software MATLAB realizada por el estudiante Dennis Calderón Vega, que estaba disponible en la empresa y se utilizó con consentimiento del desarrollador, se procedió a calcular el valor de multiplicador necesario para separar las curvas Kyle 101 de dos dispositivos conectados en serie un diferencial de tiempo mayor o igual a 120ms. La figura 6.1 muestra el resultado de tal cálculo.

| TCC 1             |           | TCC 2             |           |
|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Corriente Disparo | 200       | Corriente Disparo | 200       |
| Dial              | 1         | Tipo de Curva     | Nulec 101 |
| Tipo de Curva     | Nulec 101 | Icc max           | 6000      |

**Coordinar**      Dial: 9      Rango (ms): 120

**Figura 6.1** Valor del dial para un diferencial de 120ms entre dos curvas Kyle 101

En este punto se encontró el primer problema, para lograr separar dos curvas Kyle 101 un tiempo de 120ms, es necesario un valor de multiplicador o dial de 9. El inconveniente se presentó al ver que los reconectadores Nu-Lec N38 permiten un valor máximo de multiplicador de 2, y claramente no sería posible coordinar dos dispositivos de esta marca requiriendo un valor de 9.

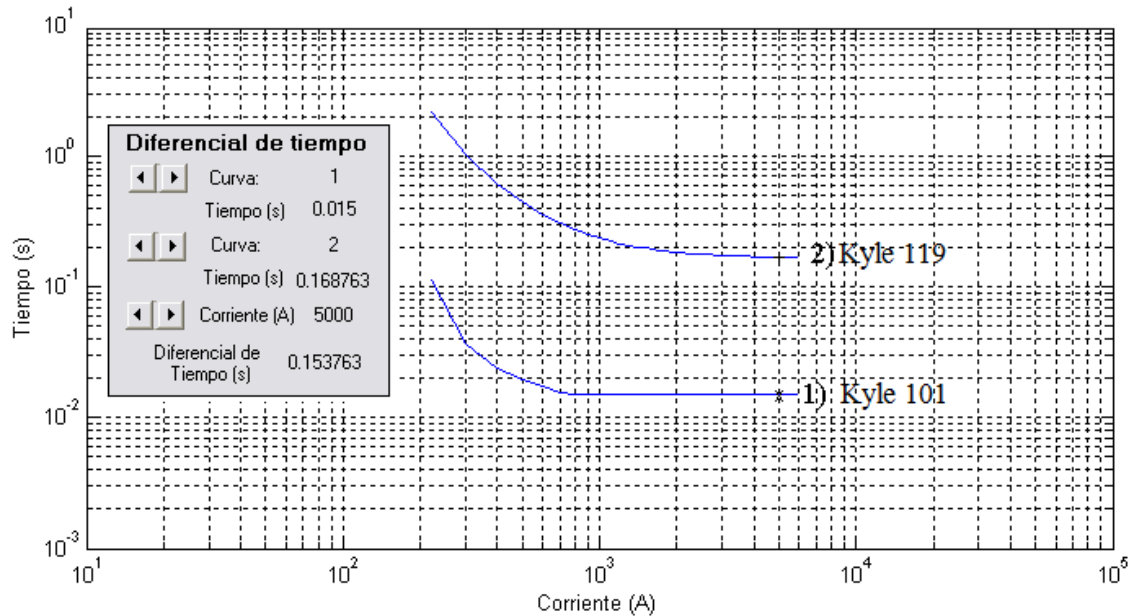
Debido a esto se hace notoria la necesidad de utilizar un tipo distinto de curva que permita la coordinación, y que a su vez sea rápida para lograr despejar una falla en el menor tiempo posible. La curva seleccionada entonces es la Kyle 119. Al coordinar una curva Kyle 101 con una Kyle 119 cumpliendo con el diferencial de tiempo establecido se obtiene el resultado mostrado en la figura 6.2.

| TCC 1             |           | TCC 2             |           |
|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Corriente Disparo | 200       | Corriente Disparo | 200       |
| Dial              | 1         | Tipo de Curva     | Nulec 119 |
| Tipo de Curva     | Nulec 101 | Icc max           | 6000      |

**Coordinar**      Dial: 0.321765      Rango (ms): 120

**Figura 6.2** Valor del dial para un diferencial de 120ms entre curvas Kyle 101 y Kyle 119

Como se observa, ahora se requiere un valor de 0,32, que para fines prácticos se redondea a 0,4, y entonces este valor sí es posible configurarlo en los dispositivos Nu-Lec N38. La figura 6.3 muestra cómo se logra un diferencial de tiempo de 153ms al utilizar este multiplicador de 0,4.



**Figura 6.3** Coordinación utilizando diales de 0,4 y 1 en las curvas Kyle 119 y Kyle 101 respectivamente

Se pretende utilizar la curva Kyle 101 en el primer disparo de los dispositivos más lejanos de la fuente de potencia, y la curva Kyle 119 en los demás dispositivos que se encuentren entre el dispositivo más lejano y la fuente de potencia. Ahora bien, empleando este valor de 0,4 en el dial de la curva Kyle 119, el rango del dial permitido en el reconectador Nu-Lec N38 que va de 0 a 2 permitiría configurar hasta 7 reconectadores en serie, usando los diales en incrementos de 0,3. Al incrementar el valor de 0,4 en 0,3, se obtiene un valor de dial de 0,7. La figura 6.4 demuestra como al procurar una separación de 120ms se requiere un dial de 0,7.



TCC 1

◀
▶

Corriente Disparo 200

◀
▶

Dial 0.4

Tipo de Curva

Nulec 119

TCC 2

◀
▶

Corriente Disparo 200

Tipo de Curva

Nulec 119

◀
▶

Icc max 6000

Coordinar

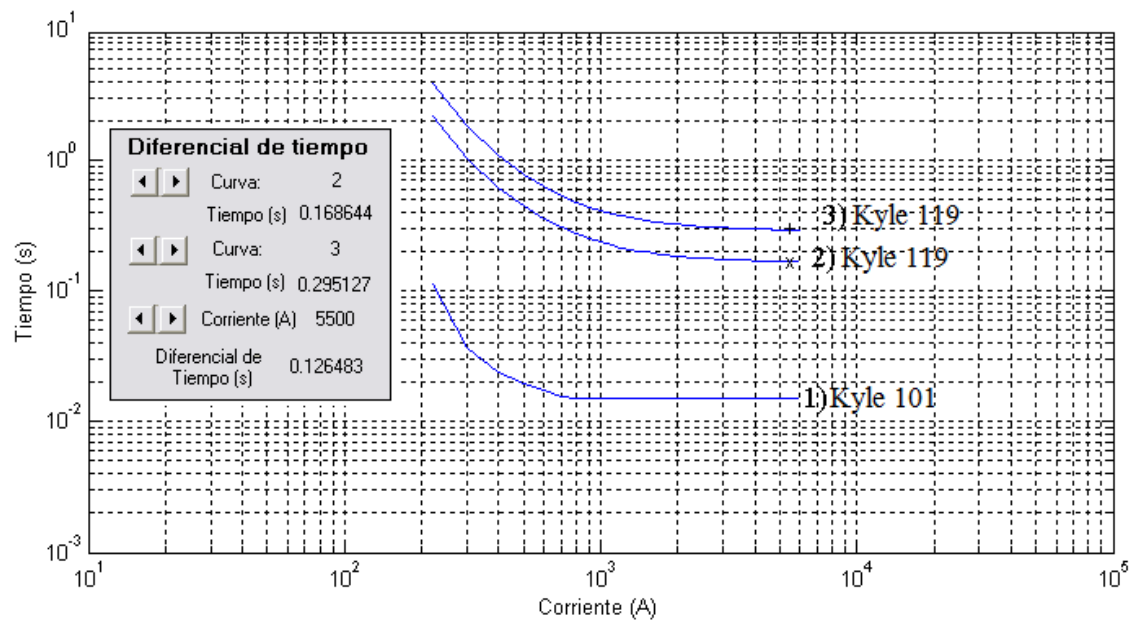
Dial 0.686013

◀
▶

Rango (ms) 120

**Figura 6.4** Dial necesario para separar 120ms dos curvas Kyle 119

La figura 6.5 muestra un diferencial de tiempo de 126ms obtenido al utilizar diales de 0,4 y 0,7 en dos curvas Kyle 119.



**Figura 6.5** Curvas graficadas manteniendo el diferencial de tiempo mínimo de 120ms

Un factor que influyó significativamente en la elección de la curva Kyle 119 consistió en que fue la utilizada en la propuesta de coordinación para circuitos

aledaños al circuito Cerrillos previamente, por lo que para mantener una compatibilidad con la misma se utilizó esta misma curva. El hecho de utilizar el mismo tipo de curva facilita la implementación de las propuestas en los diferentes circuitos, ya que de implementarse diferentes curvas en distintos circuitos se puede prestar para confusiones a la hora de programar los nuevos parámetros en cada dispositivo, siendo posible la programación de parámetros correspondientes a un dispositivo en específico, en otro dispositivo.

#### **6.1.5 Definición de alternativas de configuración**

Seguir utilizando el esquema de dos alternativas de protección, una para la operación normal y otra para la carga fría, no fue posible. Esto por que al tomar en cuenta los cambios en la topografía del circuito al cerrar los distintos reconectores de enlace se presentó la necesidad de tener más alternativas de protección.

Estos cambios en el circuito se daban cuando por ejemplo, el circuito Cerrillos enlaza con otro circuito para brindarle energía, entonces se presenta una corriente mayor por el circuito fuente, siendo necesario elevar los valores de corrientes de disparo de los reconectores que se encuentran en la ruta de la fuente hacia el reconector de enlace, esto por que ahora deberán soportar la corriente de la carga original del circuito más la carga añadida por el circuito alimentado mediante el reconector de enlace. Otro caso se presenta cuando Cerrillos es alimentado por otro circuito mediante un reconector de enlace, que a veces provoca que la corriente en algunos reconectores fluya en la dirección opuesta a la que circula en condiciones normales de operación, lo que implica cambios en los modificadores de las curvas de corriente-tiempo para lograr la coordinación con el reconector que ahora tienen aguas arriba.

### **6.2 Parámetros de configuración de los reconectores del circuito Cerrillos**

El número máximo de reconectores en serie en el circuito Cerrillos es de 4, como se puede apreciar en la figura 5.2. Estos reconectores son Dulce Nombre, Cerrillos, Quijongo y Bermejo. Además de esto los reconectores Manuel de Jesús

Jiménez y Bazar Mary se encuentran directamente después del reconector Dulce Nombre en dos ramales distintos. En la tabla 6.1 se muestra los valores propuestos para la configuración de la protección de tiempo inverso de los reconectores del circuito Cerrillos en condiciones de operación normal.

**Tabla 6.1** Configuración de los reconectores del circuito Cerrillos

| Reconector    | $I_A$ (A) | $I_B$ (A) | $I_C$ (A) | $I_{\max 150\%}$ (A) | $I_{\text{disparo}}$ (A) | Curva | Dial |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|--------------------------|-------|------|
| Bazar Mary    | 30        | 23        | 20        | 45                   | 50                       | 101   | 1    |
| Bermejo       | 3         | 4         | 1         | 6                    | 50                       | 101   | 1    |
| Cerrillos     | 74        | 57        | 150       | 225                  | 275                      | 119   | 0,7  |
| Dulce Nombre  | 132       | 137       | 229       | 344                  | 350                      | 119   | 1    |
| Manuel de J J | 22        | 27        | 19        | 41                   | 50                       | 101   | 1    |
| Puente piedra | 4         | 1         | 10        | 15                   | 50                       | 101   | 1    |
| Quijongo      | 21        | 28        | 74        | 111                  | 125                      | 119   | 0,4  |

### 6.3 Parámetros de configuración de los reconectores del circuito La Flor

Aunque el circuito La Flor no forme parte del análisis de coordinación del presente proyecto, en la tabla 6.2 se presenta valores para la configuración de los reconectores de este circuito en condiciones de operación normal.

**Tabla 6.2** Configuración de los reconectores del circuito La Flor

| Reconector   | $I_A$ (A) | $I_B$ (A) | $I_C$ (A) | $I_{\max 150\%}$ (A) | $I_{\text{disparo}}$ (A) | Curva | Dial |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|--------------------------|-------|------|
| Big Cola     | 248       | 263       | 268       | 402                  | 425                      | 119   | 0,4  |
| CEINSA       | 221       | 227       | 228       | 342                  | 350                      | 101   | 1    |
| PI Coca Cola | 73        | 71        | 72        | 110                  | 125                      | 101   | 1    |

## **6.4 Parámetros de configuración de los reconectores de enlace del circuito Cerrillos**

Para definir los parámetros a configurar en los reconectores de enlace fue necesario analizar el circuito de Cerrillos y sus conexiones con otros circuitos, esto para tomar en cuenta todas los posibles casos de operación de la red, funcionando como fuente y como carga para otros circuitos.

En este punto es importante resaltar que se partió de las configuraciones incluídas en la propuesta para los circuitos Cartago, San Blas, Tejar-Guadalupe y Grupo Z realizada previa a este proyecto. Sin embargo, en el presente proyecto, para ciertos casos se sugiere configuraciones diferentes a las incluídas en la propuesta anterior. En ella, al ser el circuito Cerrillos carga de otro circuito, se tomó en cuenta únicamente el valor de la corriente de consumo del circuito Cerrillos en condiciones de funcionamiento normal. Debido a la necesidad de lograr una compatibilidad de esta propuesta con la existente, en la presente se tomó en cuenta los reconectores de otros circuitos que quedan en serie con los del circuito Cerrillos al momento de hacer el enlace de manera que se dé un funcionamiento coordinado entre estos.

Los reconectores de enlace incluídos en el circuito Cerrillos son Miravalles, Puente Tejar, Extremos y Concorde, además de un enlace que se realiza mediante interruptores. A continuación se describe el caso de cada enlace.

### **6.4.1 Reconector Miravalles**

El reconector Miravalles enlaza al circuito Cerrillos con el circuito Tejar-Guadalupe. Mediante este enlace se hace posible que el circuito Tejar-Guadalupe brinde la potencia al circuito Cerrillos, o viceversa, es decir, que Cerrillos proporcione la energía al circuito Tejar-Guadalupe.

- Circuito Cerrillos energiza al circuito Tejar-Guadalupe: al enlazar al circuito Cerrillos con el circuito Tejar-Guadalupe se da un aumento en la corriente que fluye por el reconector Dulce Nombre.

- Circuito Tejar-Guadalupe energiza al circuito Cerrillos: en este caso, en el circuito Cerrillos la apertura se da a nivel del reconector Dulce Nombre. Los demás reconectores del circuito Cerrillos no sufren ninguna alteración en las corrientes que por ellos circula.

En la tabla 6.3 se muestra los valores sugeridos para la configuración del reconector de enlace Miravalles, y las configuraciones para los reconectores que se ven afectados con el cierre del reconector Miravalles. Además se muestra la configuración sugerida para los reconectores del circuito Tejar-Guadalupe que requieren un cambio en la configuración incluida en la “Propuesta de mejora de la coordinación de los sistemas de protección de la red eléctrica de Cartago” realizada previa a este proyecto.

**Tabla 6.3** Configuración del reconector Miravalles y los reconectores afectados con su cierre

| Circuito Fuente | Circuito Carga | Reconector   | $I_{disparo}$ (A) | Curva | Dial |
|-----------------|----------------|--------------|-------------------|-------|------|
| Cerrillos       | Tejar          | Miravalles   | 375               | 119   | 0,7  |
|                 |                | Dulce Nombre | 450               | 119   | 1    |
| Tejar           | Cerrillos      | Miravalles   | 400               | 119   | 1    |
|                 |                | Tejar*       | 550               | 119   | 1,3  |

\*Reconector del circuito Tejar-Guadalupe.

#### 6.4.2 Reconector Puente Tejar

El reconector Puente Tejar enlaza al circuito Cerrillos con el circuito Tejar-Guadalupe, los posibles escenarios de operación son:

- El circuito Cerrillos energiza al circuito Tejar-Guadalupe: cuando se cierra el reconector Puente Tejar para que el circuito Cerrillos alimente al circuito Tejar-Guadalupe las corrientes que circulan por los reconectores Cerrillos y Dulce Nombre van a aumentar.

- El circuito Tejar-Guadalupe energiza al circuito Cerrillos: en este caso el enlace se da en el reconectador Puente Tejar y se abre el reconectador Dulce Nombre, los reconectores en el circuito Cerrillos no se ven afectados, a excepción del reconectador Cerrillos, que va a experimentar un cambio en la dirección del flujo de la corriente que por él circula.

En la tabla 6.4 se muestra los valores de configuración propuestos para el reconectador de enlace Puente Tejar y los reconectores afectados por su cierre.

**Tabla 6.4** Configuración del reconectador Puente Tejar y los reconectores afectados con su cierre

| Circuito Fuente | Circuito Carga | Reconectador   | $I_{disparo}$ (A) | Curva | Dial |
|-----------------|----------------|----------------|-------------------|-------|------|
| Cerrillos       | Tejar          | Puente Tejar   | 350               | 119   | 1    |
|                 |                | Dulce Nombre   | 500               | 119   | 1,6  |
|                 |                | Cerrillos      | 425               | 119   | 1,3  |
|                 |                | Quijongo       | 200               | 119   | 0,7  |
| Tejar           | Cerrillos      | Puente Tejar   | 400               | 119   | 1    |
|                 |                | Domingo Savio* | 450               | 119   | 1,3  |
|                 |                | San Martín*    | 500               | 119   | 1,6  |
|                 |                | Tejar*         | 550               | 119   | 1,9  |

\*Reconectores del circuito Tejar-Guadalupe.

#### 6.4.3 Reconectador Extremos

El reconectador de extremos posibilita el enlace del circuito Cerrillos con el circuito Grupo Z. A continuación se explican los posibles casos de funcionamiento:

- El circuito Cerrillos energiza al circuito Grupo Z: al cerrarse el reconectador Extremos para que Cerrillos energice a Grupo Z, las corrientes que circulan por los reconectores Dulce Nombre, Cerrillos y Quijongo van a aumentar.

- El circuito Grupo Z energiza al circuito Cerrillos: en este caso, la apertura en el circuito Cerrillos se da a la altura del reconector Dulce Nombre. Los reconectores del circuito Cerrillos, Quijongo y Cerrillos, van a experimentar un cambio en la dirección del flujo de la corriente.

La tabla 6.5 muestra los parámetros de configuración propuestos tanto para el reconector de enlace Extremos como para los reconectores que se ven afectados por este enlace.

**Tabla 6.5** Configuración del reconector Extremos y los reconectores afectados con su cierre

| Circuito Fuente | Circuito Carga | Reconector   | $I_{disparo}$ (A) | Curva | Dial | $T_{adicional}$ (s) |
|-----------------|----------------|--------------|-------------------|-------|------|---------------------|
| Cerrillos       | Grupo Z        | Extremos     | 350               | 119   | 1,3  | -                   |
|                 |                | Dulce Nombre | 550               | 119   | 2    | 0,08                |
|                 |                | Cerrillos    | 500               | 119   | 1,9  | -                   |
|                 |                | Quijongo     | 425               | 119   | 1,6  | -                   |
| Grupo Z         | Cerrillos      | Extremos     | 400               | 119   | 1,01 | -                   |
|                 |                | Cerrillos    | 125               | 119   | 0,4  | -                   |
|                 |                | Quijongo     | 200               | 119   | 0,7  | -                   |
|                 |                | Coris*       | 475               | 119   | 1,31 | -                   |
|                 |                | Cartín*      | 550               | 119   | 1,61 | -                   |

\*Reconectores del circuito Grupo Z.

#### 6.4.4 Reconector Concorde

El reconector Concorde enlaza al circuito Cerrillos con el circuito Grupo Z. Al cerrar este reconector ocurre uno de los siguientes casos:

- El circuito Cerrillos energiza al circuito Grupo Z: en este escenario, se va a dar un aumento en las corrientes que fluyen por los reconectores Dulce Nombre, Cerrillos, Quijongo y Bermejo.

- El circuito Grupo Z energiza al circuito Cerrillos: en este caso, la apertura en el circuito Cerrillos se da a la altura del reconector Dulce Nombre. Las corrientes que fluyen por los reconectores Bermejo, Quijongo y Cerrillos van a sufrir un cambio en su dirección de flujo.

En la tabla 6.6 se muestra los valores propuestos de configuración para el reconector de enlace Concorde y también para los reconectores del circuito Cerrillos y del circuito Grupo Z que se ven afectados por el cierre de este reconector de enlace.

**Tabla 6.6** Configuración del reconector Concorde y los reconectores afectados con su cierre

| Circuito Fuente | Circuito Carga | Reconector   | $I_{disparo}$ (A) | Curva | Dial | $T_{adicional}$ (s) |
|-----------------|----------------|--------------|-------------------|-------|------|---------------------|
| Cerrillos       | Grupo Z        | Concorde     | 400               | 119   | 1,6  | -                   |
|                 |                | Dulce Nombre | 550               | 135   | 2    | 0,11                |
|                 |                | Cerrillos    | 550               | 119   | 2    | 0,2                 |
|                 |                | Quijongo     | 500               | 119   | 2    | 0,08                |
|                 |                | Bermejo      | 450               | 119   | 1,94 | -                   |
|                 |                | Florentina*  | 350               | 119   | 1,3  | -                   |
| Grupo Z         | Cerrillos      | Concorde     | 400               | 119   | 1,3  | -                   |
|                 |                | Cerrillos    | 125               | 119   | 0,4  | -                   |
|                 |                | Quijongo     | 200               | 119   | 0,7  | -                   |
|                 |                | Bermejo      | 275               | 119   | 1,03 | -                   |
|                 |                | Cartín*      | 550               | 119   | 2    | 0,08                |
|                 |                | Coris*       | 500               | 119   | 1,9  | -                   |
|                 |                | Florentina*  | 450               | 119   | 1,64 | -                   |

\*Reconectores del circuito Grupo Z.



#### **6.4.5 Cuchillas 230**

Las Cuchillas 230 son interruptores que enlazan al circuito Cerrillos con el circuito La Flor. Las Cuchillas 230 no presentan opciones de configuración, sino que abren o cierran manualmente. Estas cuchillas se encuentran normalmente abiertas, pero al cerrarlas los reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor deben de coordinar entre sí. Al cerrar estas cuchillas se pueden presentar dos casos:

- El circuito Cerrillos energiza al circuito La Flor: en el circuito La Flor se da una apertura a nivel del reconector Big Cola. En este caso, las corrientes que fluyen por los reconectores Dulce Nombre y Cerrillos presentan un incremento. Además, una vez cerradas las cuchillas se debe de dar un funcionamiento coordinado de los reconectores CEINSA y PI Coca Cola con el reconector Cerrillos.
- El circuito La Flor energiza al circuito Cerrillos: la apertura en el circuito Cerrillos se da a nivel del reconector Dulce Nombre. En este caso, las corrientes que fluyen por el reconector Cerrillos van a cambiar su dirección de flujo. Además los reconectores Cerrillos y Quijongo deberán coordinar con el reconector Big Cola.

La tabla 6.7 contiene las configuraciones propuestas para los reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor afectados con el cierre de las Cuchillas 230.

**Tabla 6.7** Configuración de los reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor afectados por el cierre de las Cuchillas 230

| Circuito Fuente | Circuito Carga | Reconector    | $I_{disparo}$ (A) | Curva | Dial | $T_{adicional}$ (s) |
|-----------------|----------------|---------------|-------------------|-------|------|---------------------|
| Cerrillos       | La Flor        | Dulce Nombre  | 500               | 119   | 1    | -                   |
|                 |                | Cerrillos     | 425               | 119   | 0,7  | -                   |
|                 |                | CEINSA*       | 350               | 101   | 1    | -                   |
|                 |                | PI Coca Cola* | 125               | 101   | 1    | -                   |
| La Flor         | Cerrillos      | Cerrillos     | 275               | 119   | 0,7  | -                   |
|                 |                | Quijongo      | 125               | 119   | 0,4  | -                   |
|                 |                | Big Cola*     | 425               | 119   | 1    | -                   |

\*Reconectores del circuito La Flor.

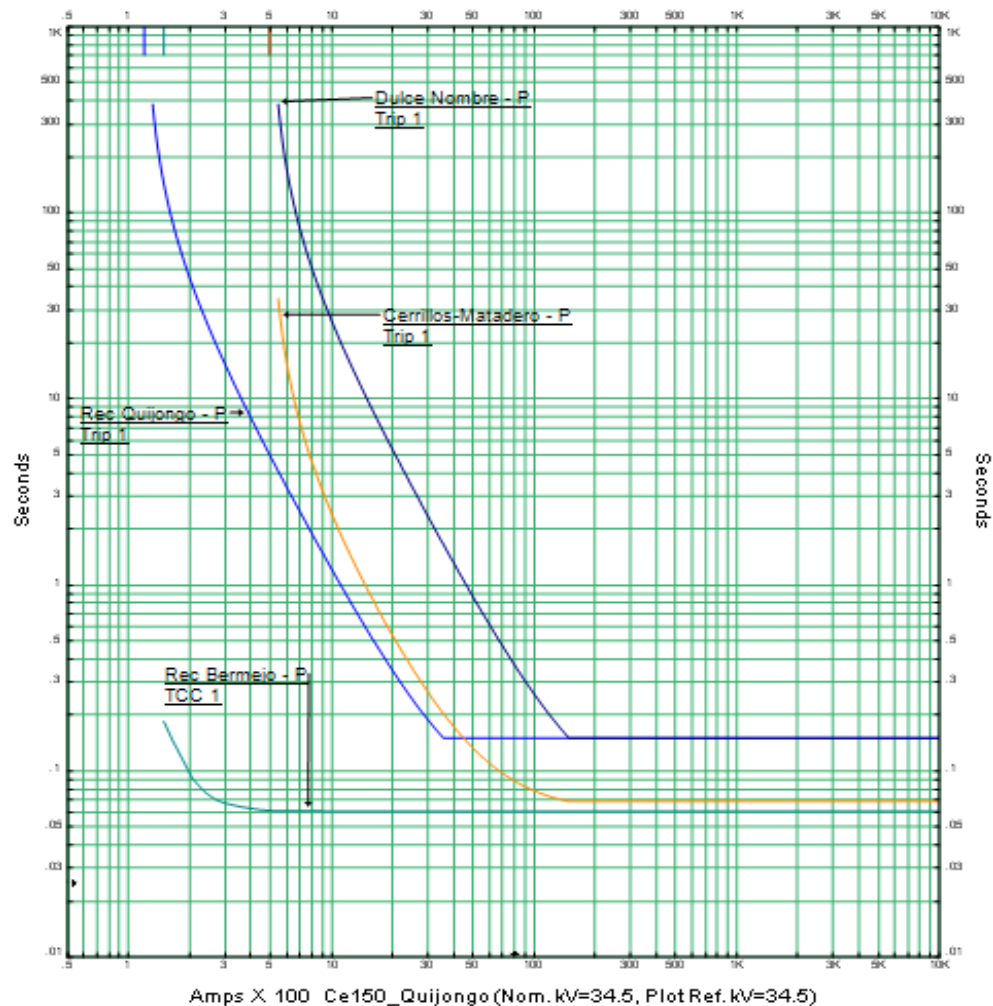
## **Capítulo 7: Análisis de resultados**

En este capítulo se demuestra los problemas que presenta actualmente el esquema de configuración de protecciones utilizado en el circuito Cerrillos por parte de la empresa, y se evidencia también cómo los parámetros de configuración propuestos en este proyecto lograron obtener la respuesta deseada por parte de los sistemas de protección.

Para demostrar esto, se utilizó la herramienta STAR del software computacional ETAP. Este software permite simular fallas en cualquier parte del circuito. Se simuló fallas utilizando la configuración actual de los reconectadores, y luego se repitió pero esta vez utilizando el esquema de protección propuesto. Los resultados de la simulación indican la temporización en el gabinete de control y el tiempo requerido por el interruptor para abrir sus contactos y aislar la falla.

## 7.1 Resultados de la simulación

Luego de simular una falla cerca del reconector más lejano a la fuente de potencia, el reconector Bermejo, se graficó las curvas de corriente-tiempo programadas en los reconectores en cascada desde la fuente de potencia hasta el reconector Bermejo, la figura 7.1 muestra estas gráficas.



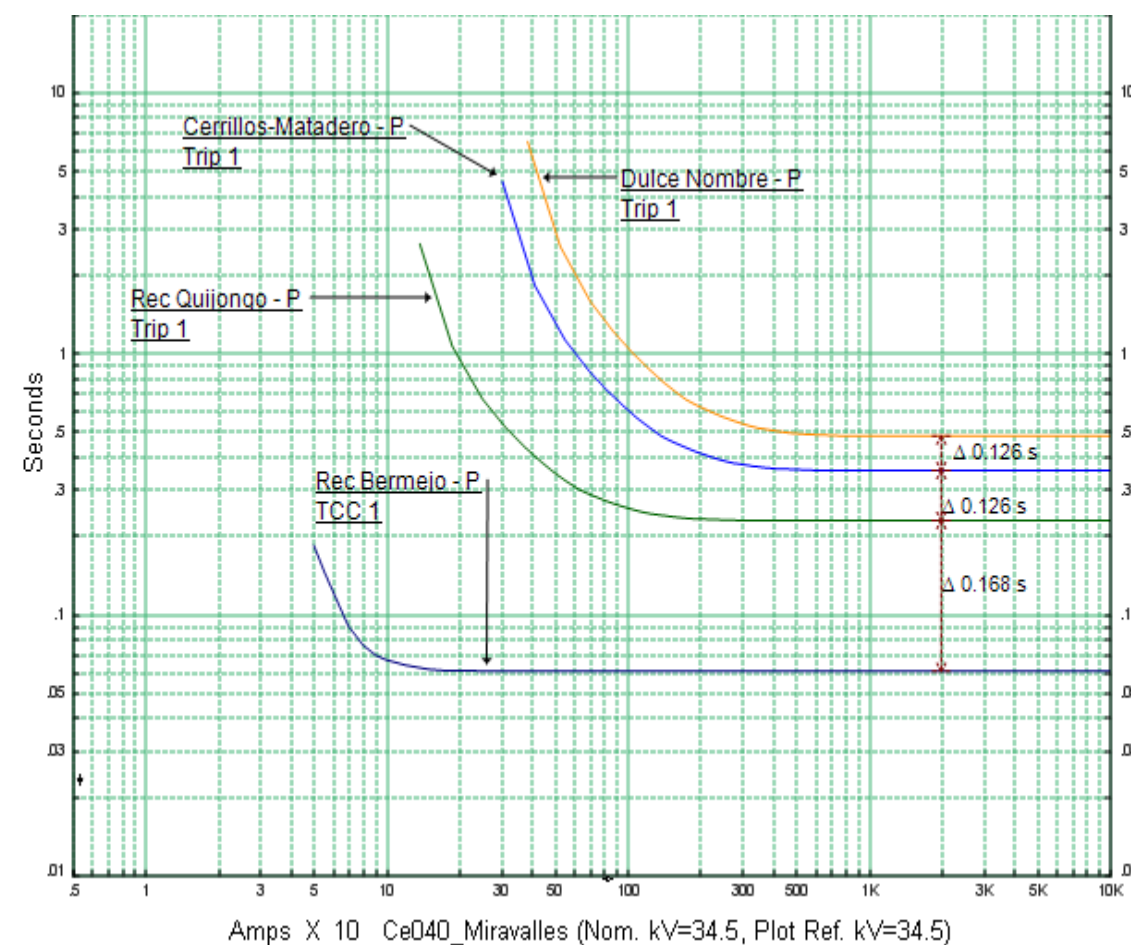
**Figura 7.1** Curvas programadas actualmente en reconectores en cascada en el circuito Cerrillos

En la figura 7.2 se muestra los resultados de la simulación de la falla cercana al reconector Bermejo.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                           |                    |         |         |         |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Rec Bermejo and ZeBermejo_Quebradilla. Adjacent to Ce_Quebradilla. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                            | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                                 | Rec Bermejo        | 3.222   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 175                                                                                                  | Rec Quijongo       | 3.165   | 115     | 175     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 249                                                                                                  | Cerrillos-Matadero | 3.125   | 189     | 249     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura 7.2** Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Bermejo

Ahora realizando el mismo procedimiento, pero usando los valores propuestos, se obtiene la figura 7.3.



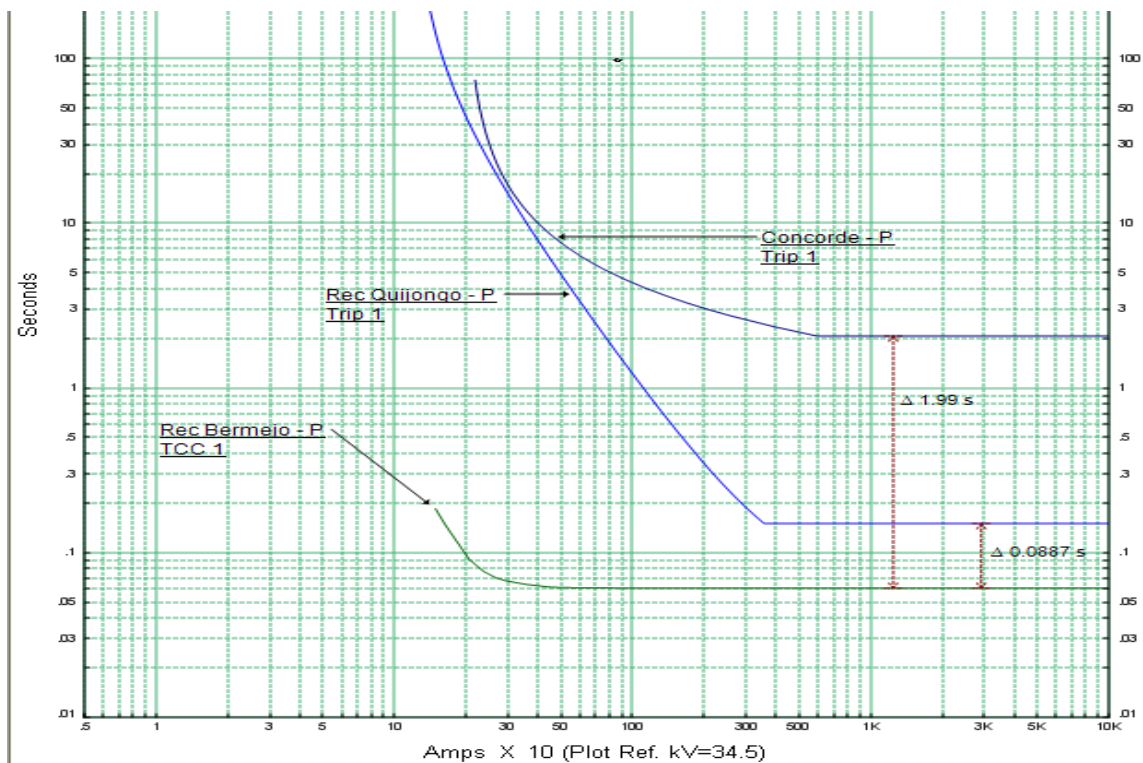
**Figura 7.3** Curvas propuestas para reconectores en cascada en el circuito Cerrillos

Los resultados de esta simulación se muestran en la figura 7.4.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                           |                    |         |         |         |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Rec Bermejo and ZeBermejo_Quebradilla. Adjacent to Ce_Quebradilla. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                            | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                                 | Rec Bermejo        | 3.222   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 228                                                                                                  | Rec Quijongo       | 3.165   | 168     | 228     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 372                                                                                                  | Cerrillos-Matadero | 3.125   | 312     | 372     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura 7.4** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Bermejo con las curvas propuestas

Ahora para el reconectador de enlace Concorde, en el caso de que el circuito Cerrillos alimenta al circuito Grupo Z, las curvas de los dispositivos implicados se muestran en la figura 7.5.



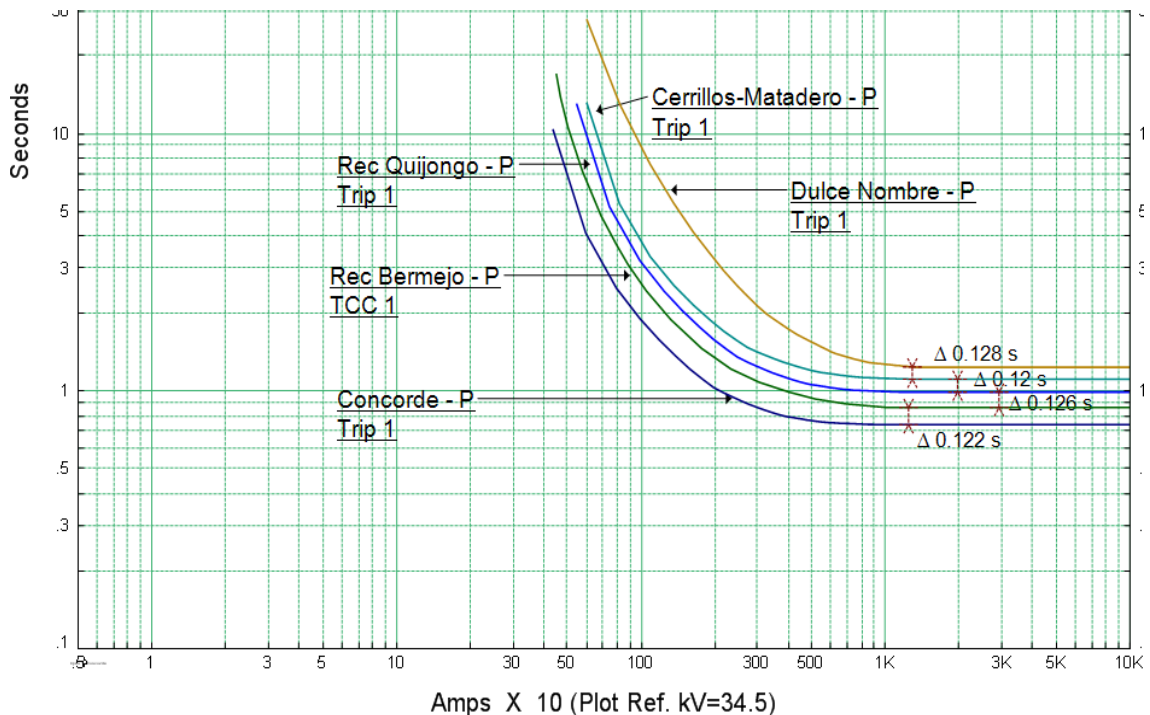
**Figura 7.5** Curvas actuales para los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Concorde

La figura 7.6 muestra los tiempos de despeje de una falla cerca del reconectador Concorde.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                                     |                    |         |         |         |                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|------------------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Ze3090_SicorsaFlorentina and Concorde. Adjacent to Ze3090_SicorsaFlorentina. |                    |         |         |         |                                                |
| Time (ms)                                                                                                      | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                                      |
| 60.4                                                                                                           | Rec Bermejo        | 2.264   | 15.4    | 60.4    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC            |
| 296                                                                                                            | Rec Quijongo       | 2.213   | 236     | 296     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |
| 462                                                                                                            | Cerrillos-Matadero | 2.174   | 402     | 462     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |
| 2795                                                                                                           | Rec1 Florentina    | 2.427   | 2735    | 2795    | 1st Operation - Lockout - Phase - Trip 1 - TOC |
| 2874                                                                                                           | Concorde           | 2.266   | 2814    | 2874    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |
| 4759                                                                                                           | Dulce Nombre       | 2.123   | 4699    | 4759    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |

**Figura 7.6** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Concorde

Utilizando los parámetros propuestos se obtiene ahora las curvas para los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Concorde, estas se muestran en la figura 7.7.



**Figura 7.7** Curvas propuestas para los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Concorde

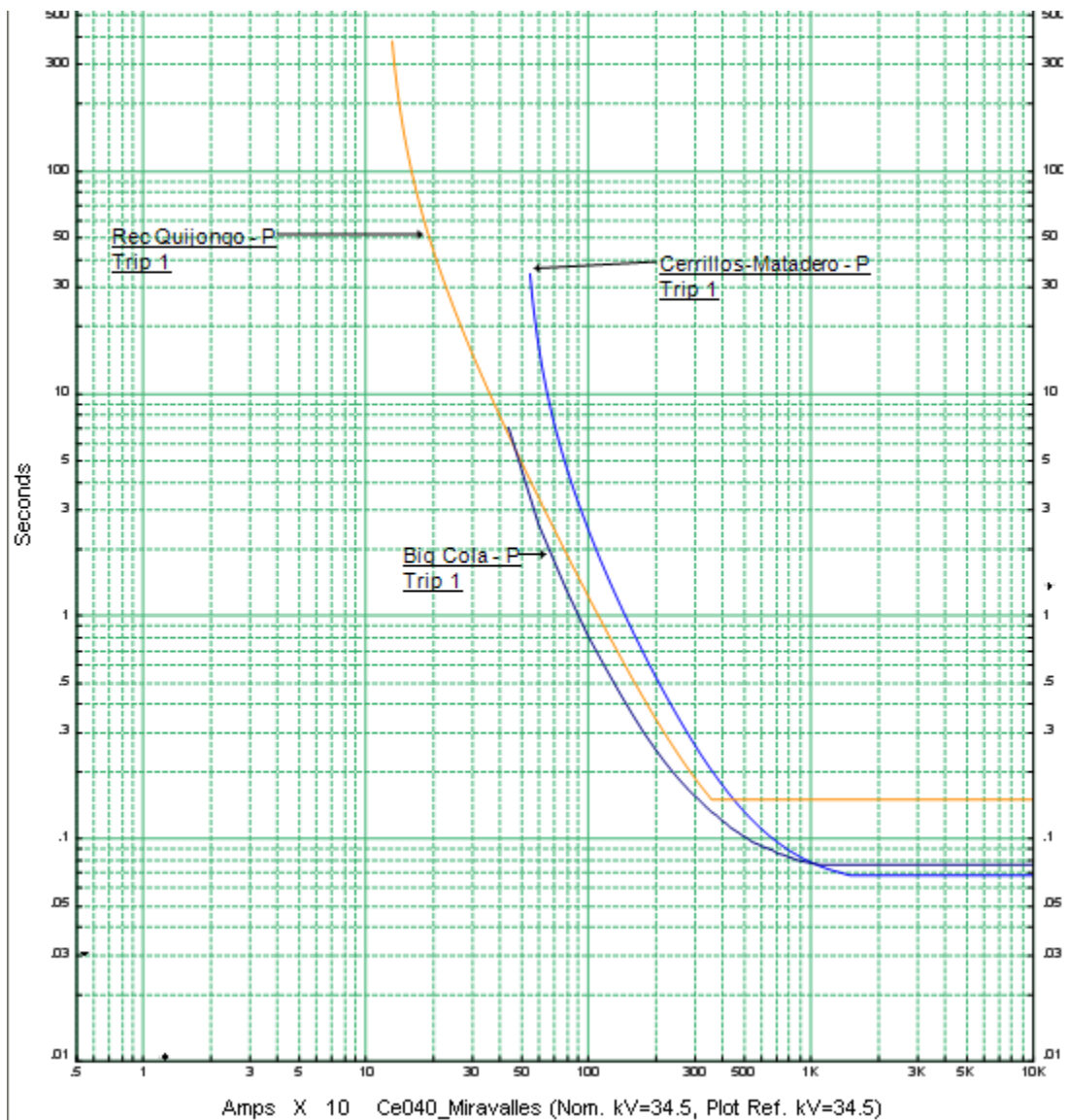
Los resultados de la simulación de una falla cercana al reconectador Concorde se muestran en la figura 7.8, utilizando las curvas propuestas.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                                              |                    |         |         |         |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Ze3090_SicorsaFlorentina and Concorde. Adjacent to Ze3090_SicorsaFlorentina. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                                      | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 962                                                                                                            | Concorde           | 2.266   | 902     | 962     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 1239                                                                                                           | Rec Bermejo        | 2.264   | 1194    | 1239    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 1462                                                                                                           | Rec Quijongo       | 2.213   | 1402    | 1462    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 1708                                                                                                           | Cerrillos-Matadero | 2.174   | 1648    | 1708    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura 7.8** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Concorde

Ahora se presenta el caso del enlace del circuito Cerrillos con el circuito La Flor mediante los interruptores Cuchillas 230. Específicamente el escenario en donde el circuito Cerrillos energiza al circuito la Flor. En la figura 7.9 se muestra las curvas actuales de los reconectadores Cerrillos, Quijongo y Big Cola.





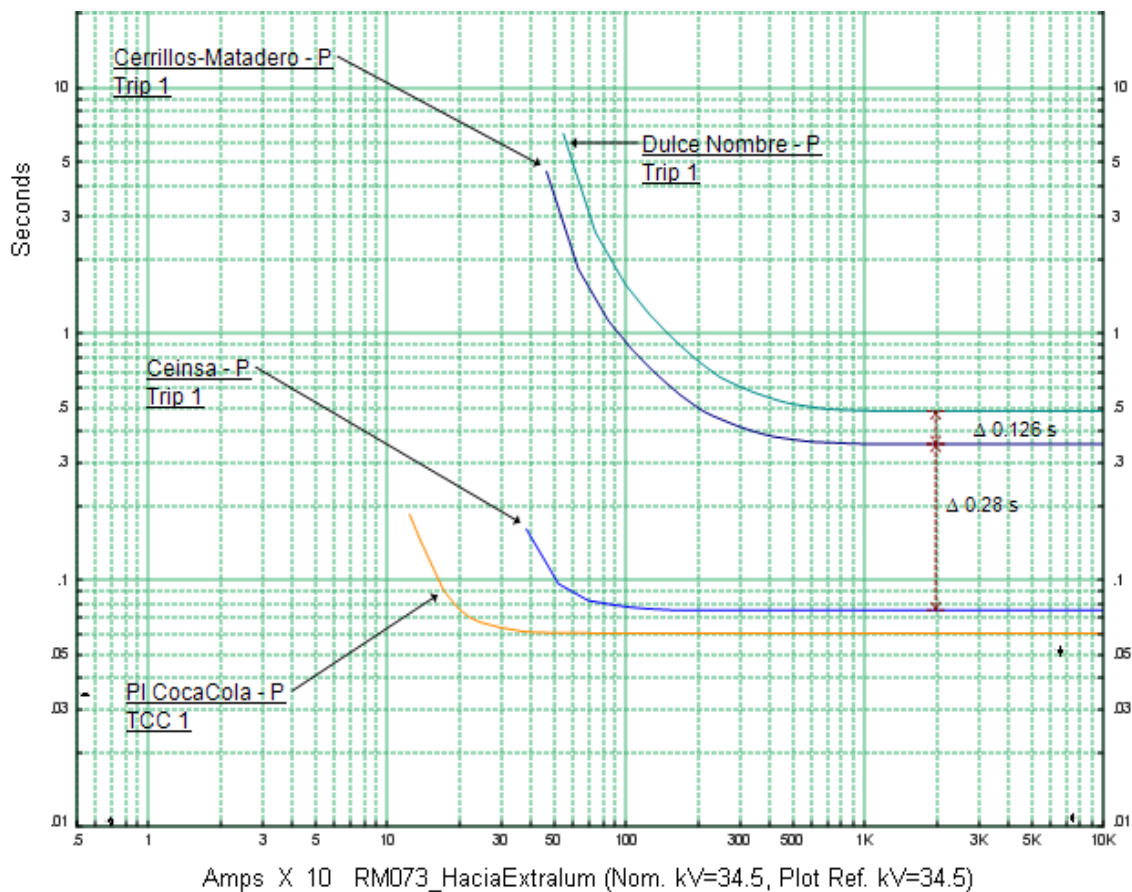
**Figura 7.9** Curvas actuales de reconectores de los circuitos Cerrillos y La Flor

Al simular una falla cerca del reconector PI Coca Cola, los tiempos necesarios para aislarla utilizando la configuración actual se presentan en la figura 7.10.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                      |                    |         |         |         |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between PI CocaCola and RMEnt2PIIndustrial. Adjacent to RMD80_Ent2PI. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                       | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 105                                                                                             | Ceinsa             | 3.818   | 45.4    | 105     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 196                                                                                             | Cerrillos-Matadero | 3.678   | 136     | 196     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 1045                                                                                            | PI CocaCola        | 4.185   | 1000    | 1045    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 1613                                                                                            | Dulce Nombre       | 3.623   | 1553    | 1613    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura 7.10** Tiempos para aislar una falla cerca del reconector PI Coca Cola

Ahora en la figura 7.11 se muestra las curvas propuestas para los reconectores involucrados en el cierre de los interruptores Cuchillas 230.



**Figura 7.11** Curvas propuestas para reconectores de Cerrillos y La Flor involucrados en el cierre de las Cuchillas 230

Finalmente la figura 7.12 muestra los tiempos necesarios para liberar una falla cercana al reconectador PI Coca Cola, utilizando las configuraciones propuestas.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                               |                    |         |         |         |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between PI CocaCola and RMEnt2PIIndustrial. Adjacent to RM080_Ent2PI. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                       | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                            | PI CocaCola        | 4.185   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 75.0                                                                                            | Ceinsa             | 3.818   | 15.0    | 75.0    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 392                                                                                             | Cerrillos-Matadero | 3.678   | 332     | 392     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 565                                                                                             | Duke Nombre        | 3.623   | 505     | 565     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura 7.12** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador PI Coca Cola

Debido a la cantidad de resultados obtenidos para los reconectadores de enlace, éstos se muestran en la sección A.1 de Apéndices.

## 7.2 Análisis

Uno de los principales problemas encontrados al analizar la configuración actual de los dispositivos de seguridad instalados en el circuito Cerrillos es el sobredimensionamiento de los valores de corriente de disparo. Ejemplos de esto pueden ser los reconectadores Bazar Mary, Cerrillos y Bermejo. Al ver la tabla 5.1, las configuraciones actuales de corriente de disparo son de 290A, 500A y 150A para los reconectadores Bazar Mary, Cerrillos y Bermejo respectivamente. Cuando las corrientes de línea alcanzan apenas valores de 30A para Bazar Mary, 150A para Cerrillos y 4A para Bermejo, según se muestra en la tabla 5.8. Estos altos valores de corrientes de disparo causan que el sistema pierda sensibilidad ante la presencia de una falla, permitiendo que la falla se propague y afecte un área mayor de clientes.

El método más comúnmente usado para corroborar la coordinación entre sistemas de protección es graficando las curvas de corriente-tiempo utilizadas en los dispositivos que se encuentren en cascada, y se busca que las gráficas de estas curvas mantengan cierta separación en tiempo y en corriente según los criterios empleados. Como se mencionó antes, en el presente proyecto se definió un diferencial mínimo de tiempo entre curvas de 120ms, que corresponde al doble del tiempo del retardo mecánico del dispositivo de protección más lento, y el diferencial de corriente se escogió de 75A siempre y cuando fuera posible, una separación de 50A se considera todavía aceptable.

Al observar la figura 7.1, que muestra las curvas de los dispositivos de la rama más larga del circuito Cerrillos, se aprecia que se da el traslape de las curvas de los dispositivos Cerrillos y Quijongo, y el diferencial de tiempo entre las curvas del dispositivo Quijongo y Bermejo es muy pequeño, de manera que de presentarse una falla, no se sabe con certeza cuál dispositivo abrirá primero, o en los casos de traslape de curvas se da que dos dispositivos abren al mismo tiempo, provocando la interrupción de la energía en un área mayor.

En el caso de la figura 7.5, de manera similar al caso anterior, las curvas de los reconectadores Bermejo y Quijongo tienen un diferencial de tiempo entre ellas muy pequeño. De provocarse una falla cerca del reconectador Concorde, la misma sería detectada primero por los reconectadores Bermejo y Quijongo, como se puede apreciar en la figura 7.6.

Para el caso del enlace entre los circuitos Cerrillos y La Flor mediante las Cuchillas 230, se aprecia en la figura 7.9 cómo las curvas de los dispositivos Big Cola, Quijongo y Cerrillos se traslapan entre sí, demostrando un funcionamiento no coordinado.

Como se pudo ver, este tipo de problema se repite en varios ramales del circuito, evidenciándose una necesidad de reconfigurar las protecciones eléctricas para lograr un funcionamiento coordinado que venga a reducir los falsos disparos, el área afectada al presentarse una falla y la falta de sensibilidad para detectar fallas.

Al utilizar los parámetros de configuración propuestos se obtiene un comportamiento distinto por parte de las protecciones eléctricas. En la figura 7.3 se puede observar las curvas propuestas para los dispositivos de la rama más larga del circuito Cerrillos, se nota como hay un diferencial de tiempo de 126ms entre las curvas de los dispositivos Dulce Nombre y Cerrillos, y de igual forma existe un diferencial adecuado de 126ms entre las curvas de los dispositivos Cerrillos y Quijongo.

Para el caso de la figura 7.7, se puede observar ahora como se mantienen los diferenciales de tiempo mayores o iguales a 120ms. Y la coordinación se comprueba al simular una falla cercana al dispositivo Concorde, y como se puede notar en la figura 7.8, la falla es despejada por el reconectador Concorde.

Finalmente, en la figura 7.11 se observa como las curvas que en la figura 7.9 se traslapaban entre ellas, ahora mantienen un diferencial de tiempo mínimo de 126ms, que cumple con el diferencial mínimo de separación buscado. En la figura

7.12 se nota cómo al simular una falla cercana al dispositivo PI Coca Cola, es este mismo el que la aísla.

De esta manera se logra cumplir con los diferenciales de corriente y tiempo para garantizar una respuesta coordinada y selectiva por parte del sistema de protección.

En cuanto a los valores de corriente de fase medidos utilizados en la definición de las corrientes de disparo, se puede observar en las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 que los coeficientes de variación no superan al 5%, lo que garantiza que las mediciones realizadas son confiables. De igual manera, los valores máximos obtenidos para las corrientes de fase de cada circuito, que se encuentran contenidos en la tabla 5.7, presentan un valor máximo de coeficiente de variación de 9%, estando por debajo del 10% máximo deseado para considerar aceptables los valores medidos. De esta manera se cumple con el segundo objetivo específico.

Es importante mencionar que al cerrar los diferentes reconectadores de enlace, los reconectadores que no se mencionan en las tablas utilizan la configuración normal de funcionamiento.

Finalmente, para lograr el comportamiento coordinado deseado por parte de las protecciones del circuito Cerrillos fue necesario implementar nuevos criterios a la hora de determinar los valores de configuración. Estos criterios nuevos vendrían a ser la utilización de los modificadores de curvas, así como el tipo de curva rápida para el primer disparo de los dispositivos de protección. De esta manera se logró obtener el comportamiento coordinado deseado.

## **Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones**

### **8.1 Conclusiones**

- Los modificadores de curvas permitieron obtener los diferenciales de tiempo deseados para lograr un comportamiento coordinado entre los sistemas de protección.
- Se requirió más de dos alternativas de configuración de los reconectadores para lograr mantener el funcionamiento coordinado en cualquiera de los posibles escenarios de operación de la red.
- La configuración actual de los reconectadores no posee sensibilidad suficiente para la detección de fallas.
- Los reconectadores se posicionan de manera estratégica en la red de distribución para aislar las fallas de la manera más rápida posible.
- Los softwares de simulación como ETAP permiten realizar pruebas que son prácticamente imposibles de realizar a escala real debido a su peligrosidad para el personal y el riesgo que corren los equipos.
- El empleo del programa ETAP permitió corroborar la coordinación de los dispositivos de protección utilizando los parámetros propuestos.

## **8.2 Recomendaciones**

- En caso de realizar futuras propuestas para coordinar el total de la red de distribución de la empresa JASEC, se recomienda analizar y tomar en cuenta las propuestas realizadas previamente para buscar lograr una compatibilidad entre propuestas que facilite la implementación de las mismas.
- Instruir al personal para que se familiarice con los criterios y parámetros propuestos, esto para que por cuenta propia sea capaz de detectar posibles errores a la hora de programar los reconectores.
- Revisar de manera periódica las configuraciones de los reconectores para asegurarse que utilizan la alternativa adecuada.
- Supervisar periódicamente el comportamiento de las corrientes de línea de los distintos circuitos para detectar si, por aumento de carga al ir creciendo el número de clientes, se requiere actualizar los valores de corrientes de disparo de los reconectores.
- A la hora de realizar maniobras que incluyan el cierre de reconectores de enlace, asegurarse de que la alternativa de protección a seleccionar en los distintos reconectores es la adecuada.



## Bibliografía

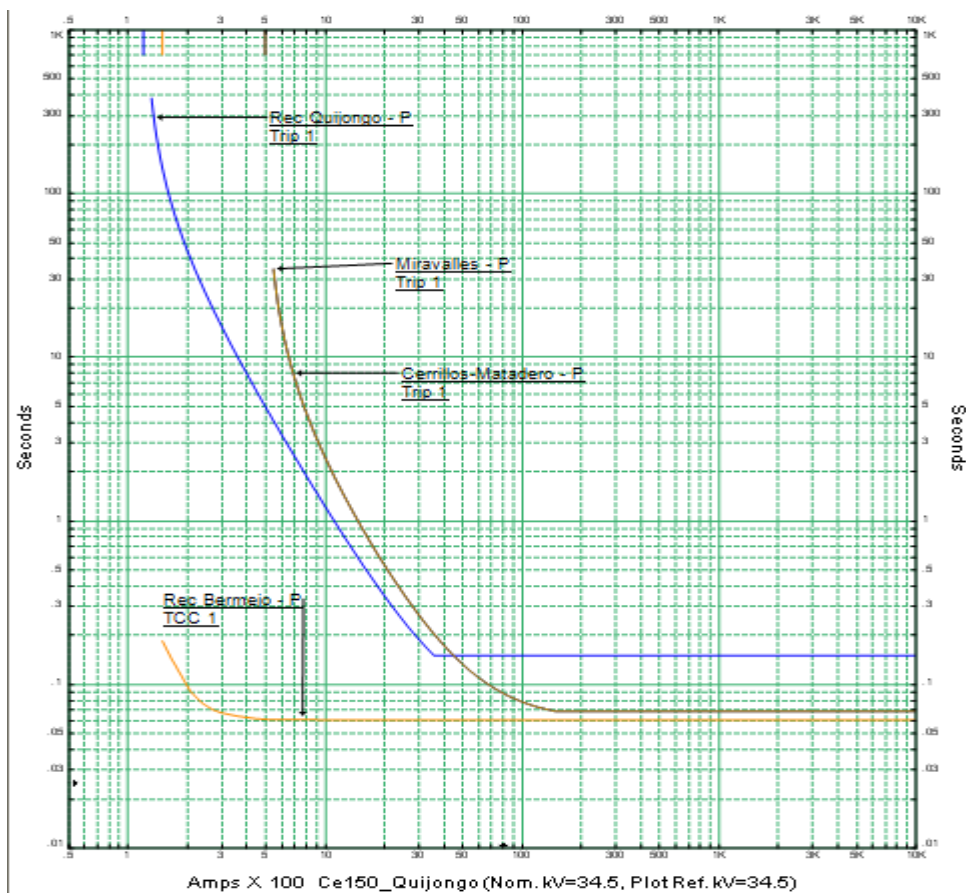
1. Enríquez Harper, Gilberto., ***Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión.*** México: Limusa, 1974.
2. Enríquez Harper, Gilberto., ***Elementos de diseño de instalaciones eléctricas e industriales.*** México: Limusa; Noriega, c1996.
3. Funk, Gernot., ***Cálculo de corrientes de cortocircuito.*** Madrid: Paraninfo, 1973.
4. Ravindranath, B y Chander, M., ***Protección de sistemas de potencia e interruptores.*** México: Limusa, 1980.
5. Nu-Lec Industries [en línea]. <<http://www.nulec.com>> [Consulta: 5 abril 2009].
6. Cooper Industries [en línea]. <[www.cooperindustries.com](http://www.cooperindustries.com)> [Consulta: 4 abril 2009].
7. The ABB Group – Automation and Power Technologies [en línea] <[www.abb.com](http://www.abb.com)> [Consulta: 4 de abril 2009].
8. ETAP – Electrical Power System Analysis Software [en línea] <<http://etap.com>> [Consulta: 17 de abril 2009].

## Apéndices

### A.1 Resultados y curvas para los reconectores de enlace

#### ▪ Reconector Miravalles

En la figura A.1.1 se muestra las curvas de configuración actual de los reconectores involucrados con el cierre del reconnector Miravalles.



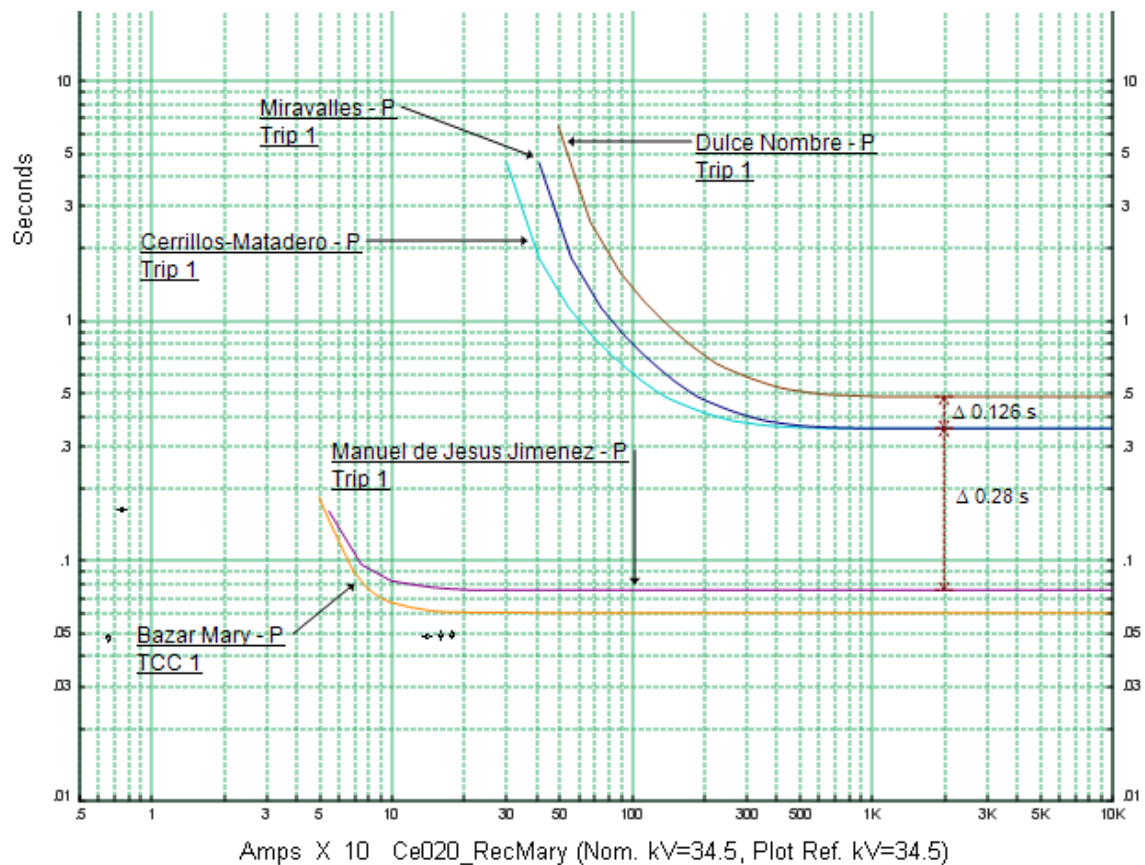
**Figura A.1.1** Curvas actuales de los reconectores implicados con el cierre del reconnector Miravalles

Ahora simulando una falla cerca del reconnector Miravalles, se muestra en la figura A.1.2 los tiempos de liberación de la falla.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                        |              |         |         |         |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Miravalles and TGColMira_SubCerr. Adjacent to Ce040_Miravalles. |              |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                         | ID           | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 130                                                                                               | Miravalles   | 5.086   | 70.3    | 130     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 917                                                                                               | Dulce Nombre | 4.857   | 857     | 917     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.2** Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Miravalles

La figura A.1.3 muestra las curvas propuestas para los reconectores involucrados al cerrar el reconector Miravalles, para el caso en que el circuito Cerrillos energiza al circuito Tejar-Guadalupe.



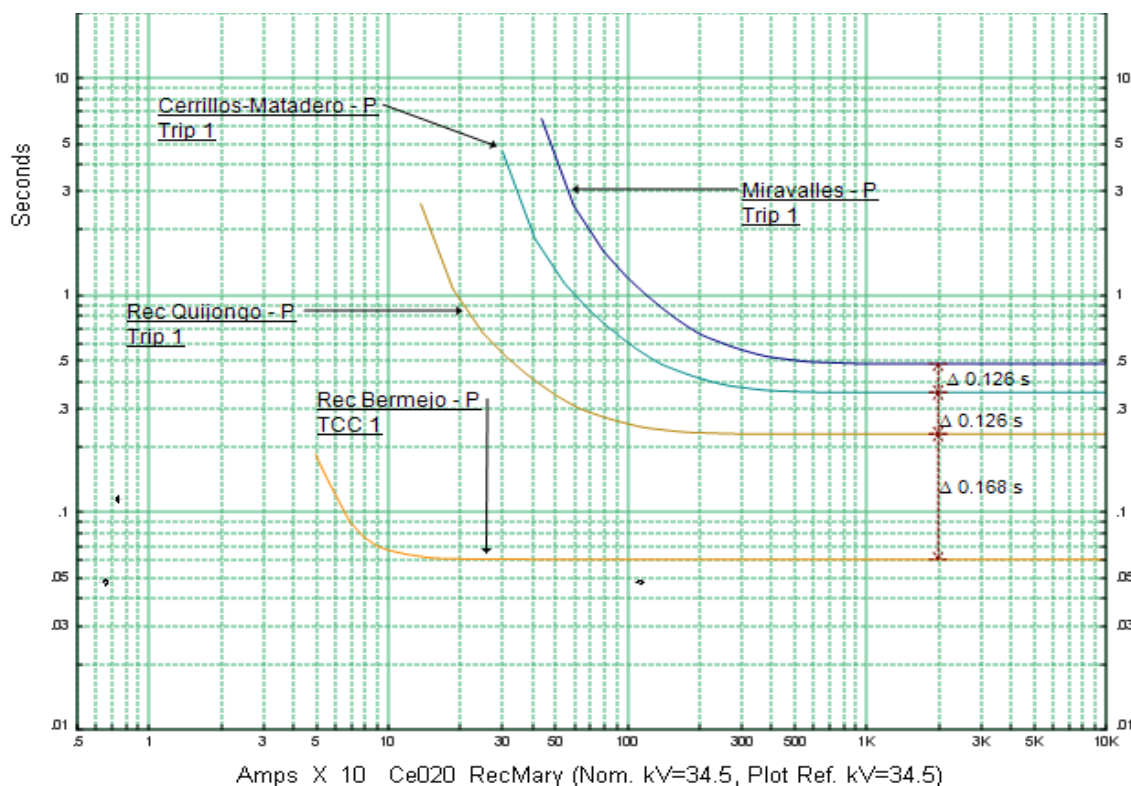
**Figura A.1.3** Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Miravalles

En la siguiente figura se muestra los tiempos necesarios para despejar una falla cercana al reconectador Miravalles utilizando las curvas propuestas.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                                 |                         |         |         |         |                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Miravalles and TGC01Mira_SubCerr. Adjacent to Ce040_Miravalles. |                         |         |         |         |                                       |
| Time (ms)                                                                                         | ID                      | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                             |
| 160                                                                                               | Manuel de Jesus Jimenez | 0.054   | >100    | >160    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - T0 C |
| 364                                                                                               | Miravalles              | 5.086   | 304     | 364     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - T0 C |
| 510                                                                                               | Dulce Nombre            | 4.857   | 450     | 510     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - T0 C |

**Figura A.1.4** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Miravalles

La figura A.1.5 presenta las curvas de los dispositivos involucrados con el cierre del reconectador Miravalles para el caso en que el circuito Tejar-Guadalupe energiza al circuito Cerrillos.



**Figura A.1.5** Curvas propuestas de los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Miravalles

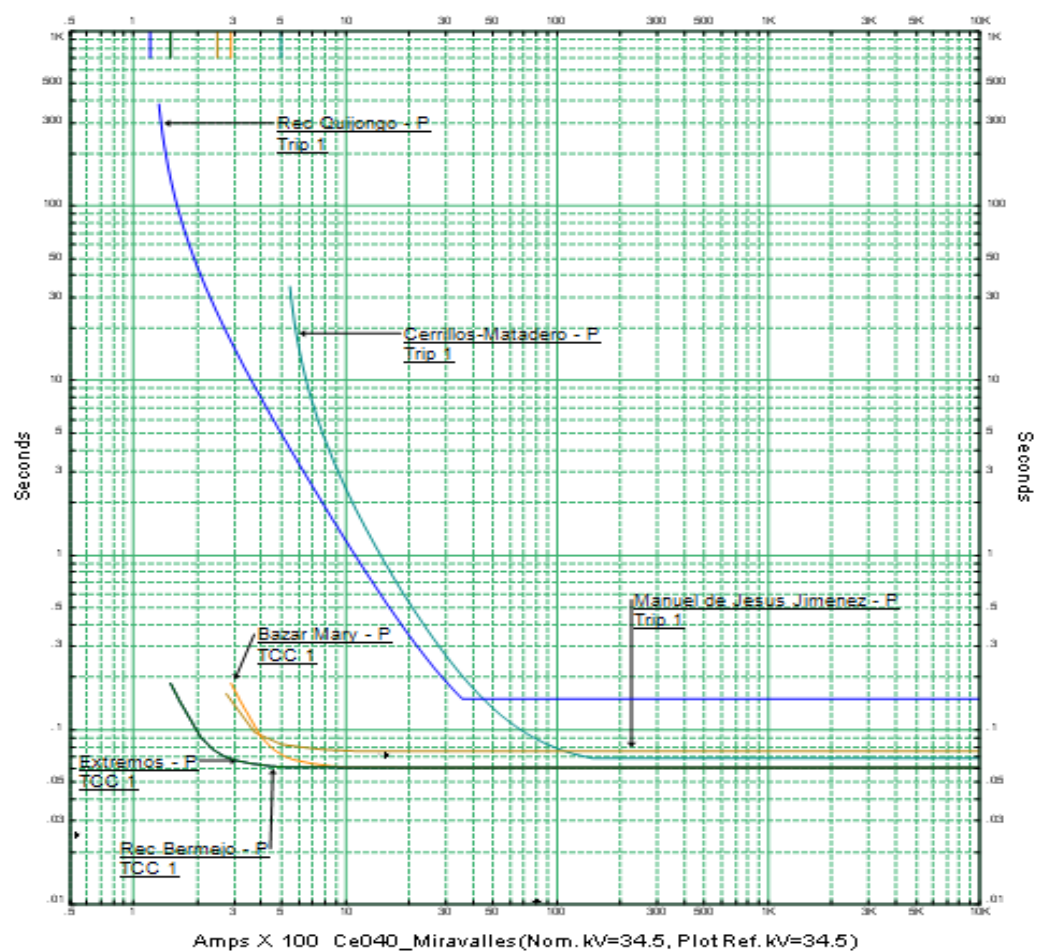
Simulando una falla cerca del reconectador más lejano de la fuente, en este caso el reconectador Bermejo, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.6.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                                    |                    |         |         |         |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Rec Bermejo and ZeBermejo_Quebradilla. Adjacent to Ce_Quebradilla. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                            | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                                 | Rec Bermejo        | 3.000   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 228                                                                                                  | Rec Quijongo       | 2.943   | 168     | 228     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 376                                                                                                  | Cerrillos-Matadero | 2.901   | 316     | 376     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 569                                                                                                  | Miravalles         | 2.846   | 509     | 569     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.6** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Miravalles

- **Reconectador Extremos**

En la figura A.1.7 se muestra las curvas actuales de los reconectadores Extremos, Bermejo, Quijongo, Cerrillos Bazar Mary y Manuel de Jesús Jiménez.

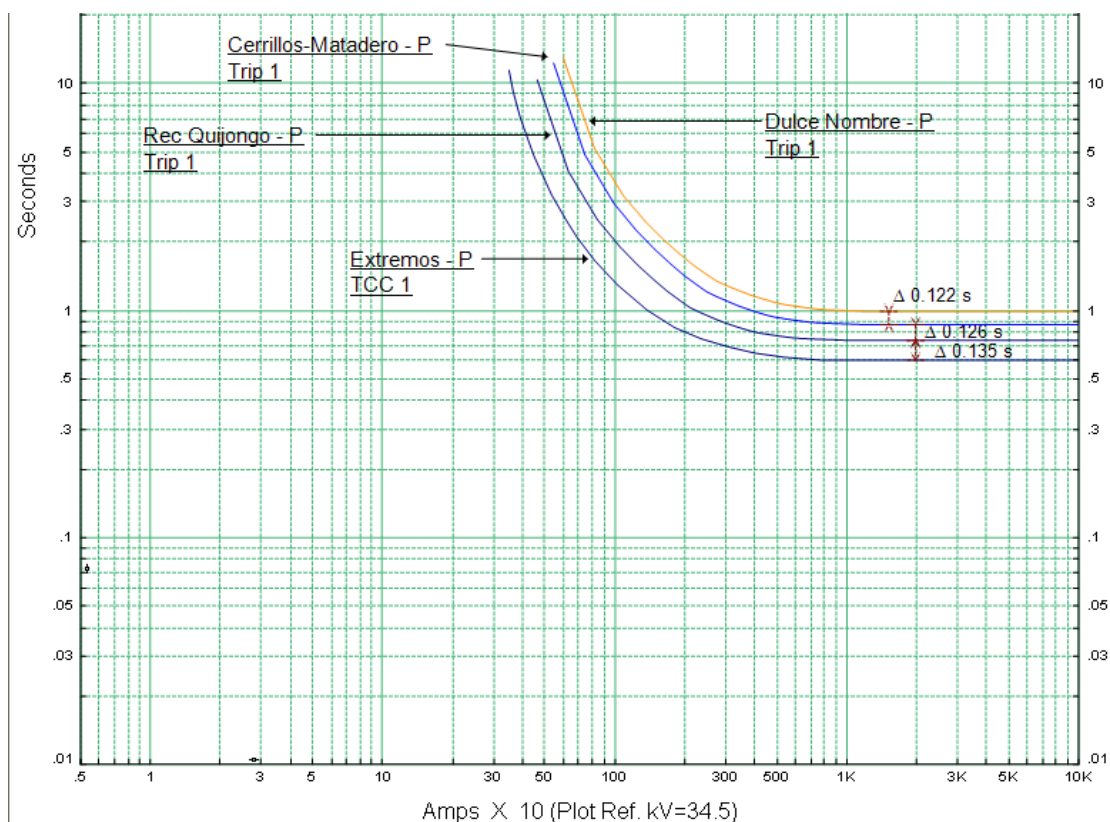


**Figura A.1.7** Curvas actuales de los reconectores del circuito Cerrillos y el reconector Extremos  
Simulando una falla cerca del reconector más lejano de la fuente, en este caso el reconector Extremos, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.8.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                          |                    |         |         |         |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Extremos and ZeSabanaGde_NMilenium. Adjacent to Cel7010_SabanGde. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                           | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                                | Extremos           | 2.942   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 199                                                                                                 | Rec Quijongo       | 2.877   | 139     | 199     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 292                                                                                                 | Cerrillos-Matadero | 2.827   | 232     | 292     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 2775                                                                                                | Duke Nombre        | 2.760   | 2715    | 2775    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.8** Tiempos para aislar una falla cerca del reconector Extremos

La figura A.1.9 muestra las curvas propuestas para los reconectadores del circuito Cerrillos y el reconectador Extremos, para el caso en que el circuito Cerrillos energiza al circuito Grupo Z.



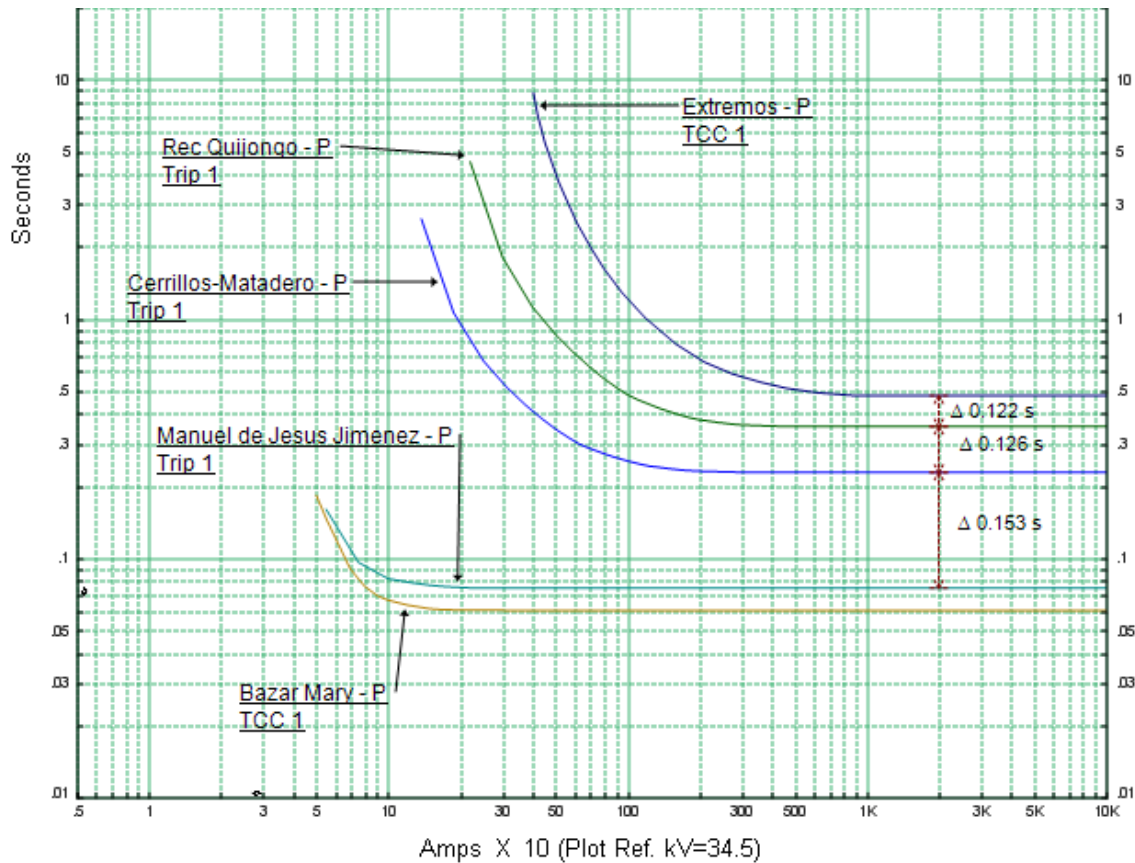
**Figura A.1.9** Curvas propuestas de los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Extremos

En la siguiente figura se muestra los tiempos necesarios para despejar una falla cercana al reconectador Extremos utilizando las curvas propuestas.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                          |                    |         |         |         |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Extremos and ZeSabanaGde_NMilenium. Adjacent to Cel7010_SabanGde. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                           | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 698                                                                                                 | Extremos           | 2.942   | 653     | 698     | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 891                                                                                                 | Rec Quijongo       | 2.877   | 831     | 891     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 1133                                                                                                | Cerrillos-Matadero | 2.827   | 1073    | 1133    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 1342                                                                                                | Dulce Nombre       | 2.760   | 1282    | 1342    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.10** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Extremos

La figura A.1.11 muestra las curvas propuestas para los reconectores del circuito Cerrillos y el reconector Extremos para el caso en que el circuito Grupo Z energiza al circuito Cerrillos.



**Figura A.1.11** Curvas propuestas de los reconectores implicados con el cierre del reconector Extremos

Simulando una falla cerca del reconector más lejano de la fuente, en este caso el reconector Bazar Mary, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.12.

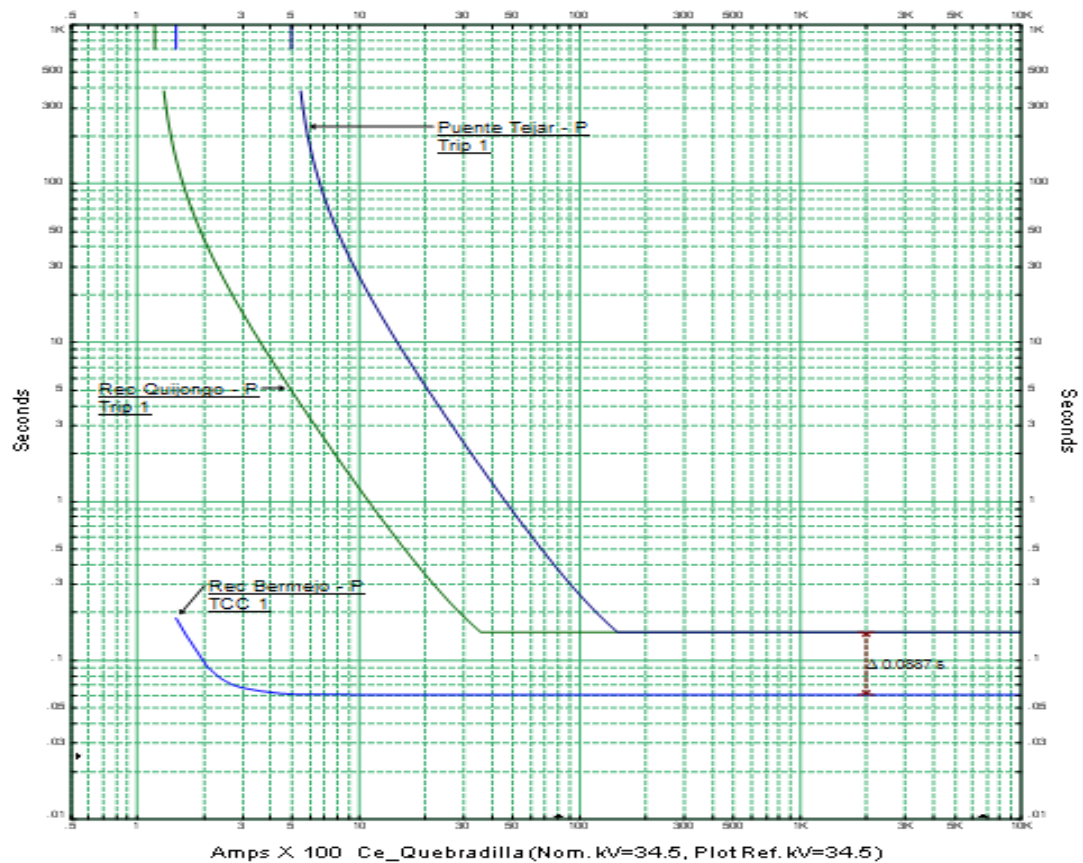


| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                             |                         |         |         |         |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between RecloMary and Bazar Mary. Adjacent to Ce020_RecMary. |                         |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                              | ID                      | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                   | Bazar Mary              | 2.626   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 160                                                                                    | Manuel de Jesus Jimenez | 0.050   | >100    | >160    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 229                                                                                    | Cerrillos-Matadero      | 2.526   | 169     | 229     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 368                                                                                    | Rec Quijongo            | 2.482   | 308     | 368     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 619                                                                                    | Extremos                | 2.440   | 573     | 619     | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |

**Figura A.1.12** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Bazar Mary

▪ **Reconectador Puente Tejar**

En la figura A.1.13 se muestra las curvas actuales de los reconectadores Puente Tejar, Bermejo y Quijongo.



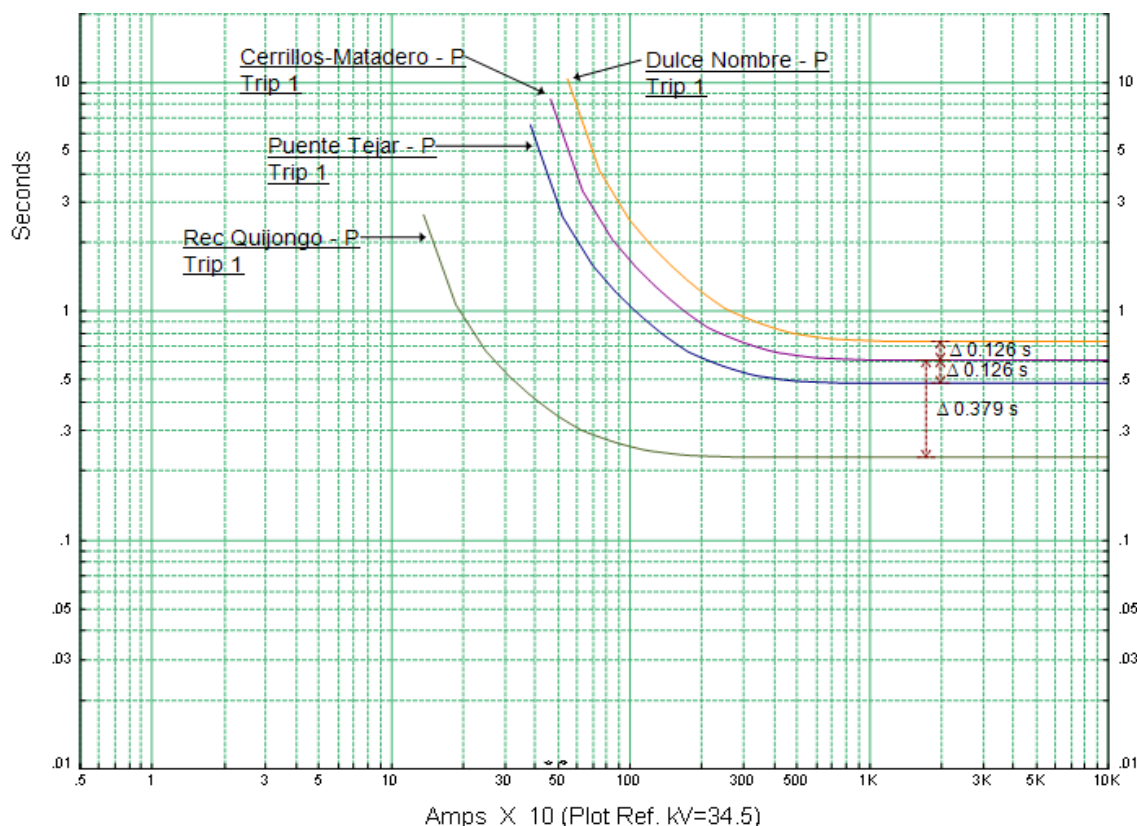
**Figura A.1.13** Curvas actuales de los reconectadores del circuito Cerrillos y el reconectador Puente Tejar

Simulando una falla cerca del reconectador Puente Tejar, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.14.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                           |                         |         |         |         |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between TG130_PuenteTejar and Puente Tejar. Adjacent to TG130_PuenteTejar. |                         |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                            | ID                      | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 75.0                                                                                                 | Manuel de Jesus Jimenez | 2.409   | 15.0    | 75.0    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 311                                                                                                  | Cerrillos-Matadero      | 2.723   | 251     | 311     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 838                                                                                                  | Dulce Nombre            | 5.096   | 778     | 838     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 2609                                                                                                 | Puente Tejar            | 2.845   | 2549    | 2609    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.14** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Manuel de Jesús Jiménez

La figura A.1.15 muestra las curvas propuestas para los reconectadores del circuito Cerrillos y el reconectador Puente Tejar, para el caso en que el circuito Cerrillos energiza al circuito Tejar-Guadalupe.



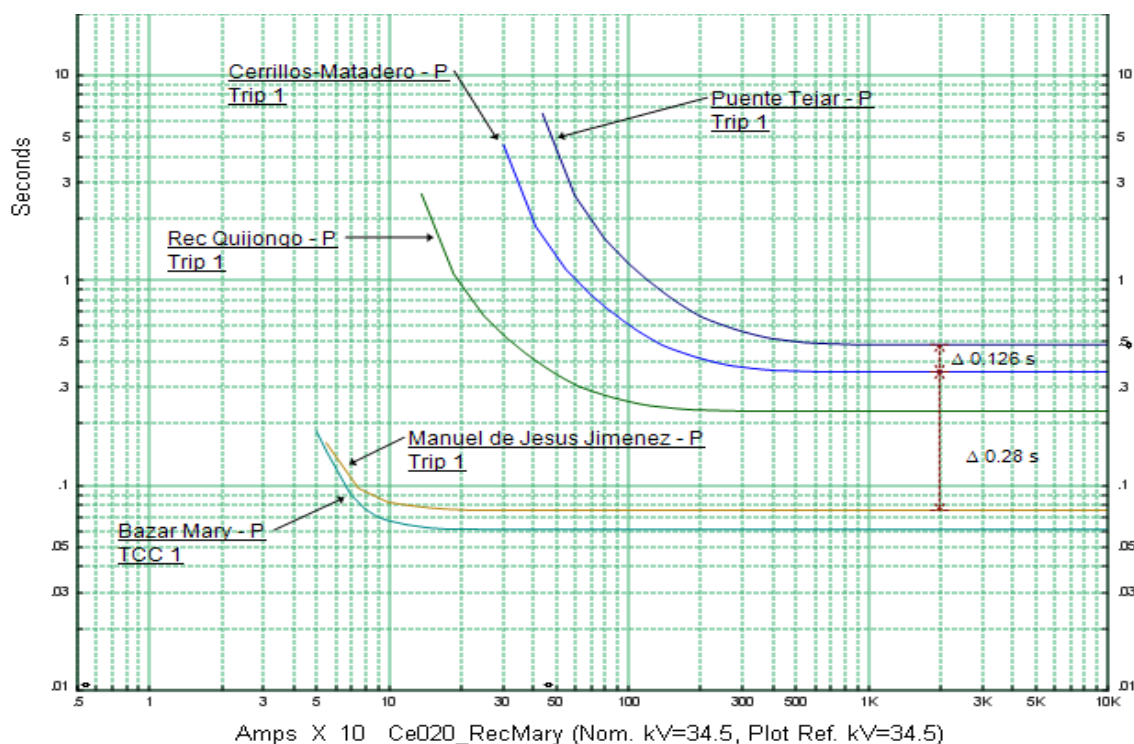
**Figura A.1.15** Curvas propuestas de los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Puente Tejar

En la siguiente figura se muestra los tiempos necesarios para despejar una falla cercana al reconectador Puente Tejar utilizando las curvas propuestas.

| <b>Sequence-of-Operation Event Summary Report</b>                                                    |                         |         |         |         |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between TG130_PuenteTejar and Puente Tejar. Adjacent to TG130_PuenteTejar. |                         |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                            | ID                      | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 75.0                                                                                                 | Manuel de Jesus Jimenez | 2.409   | 15.0    | 75.0    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 544                                                                                                  | Puente Tejar            | 2.845   | 484     | 544     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 752                                                                                                  | Cerrillos-Matadero      | 2.723   | 692     | 752     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 786                                                                                                  | Dulce Nombre            | 5.096   | 726     | 786     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.16** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Puente Tejar

La figura A.1.17 muestra las curvas propuestas para los reconectadores del circuito Cerrillos y el reconectador Puente Tejar para el caso en que el circuito Tejar-Guadalupe energiza al circuito Cerrillos.



**Figura A.1.17** Curvas propuestas de los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Puente Tejar

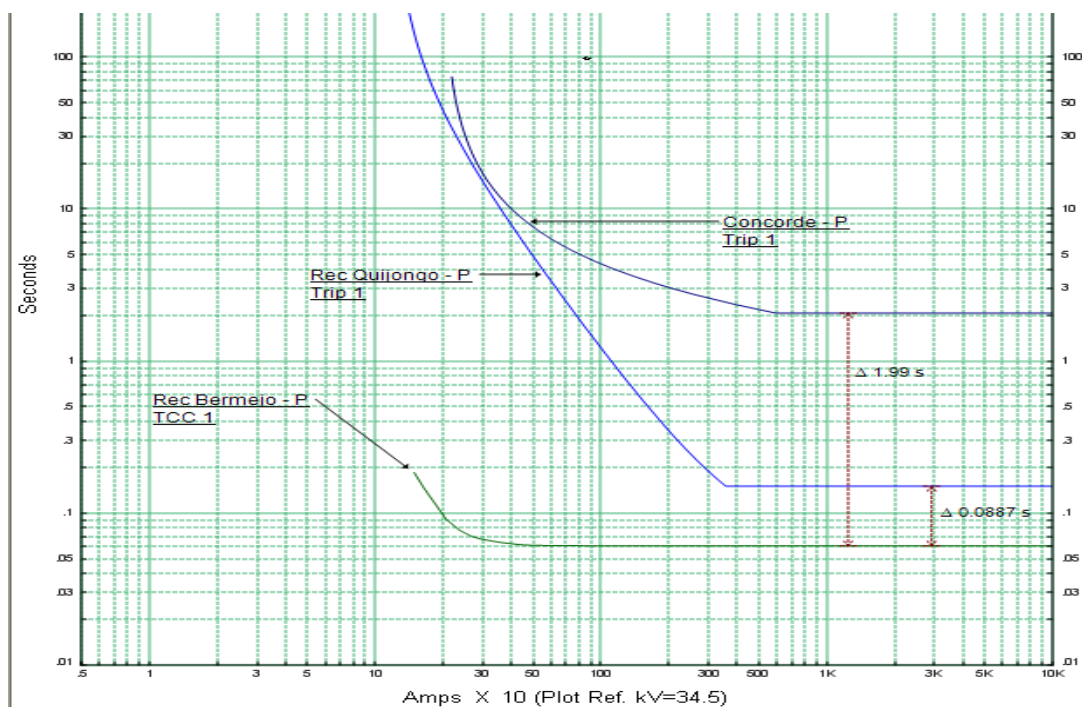
Simulando una falla cerca de un reconectador lejano de la fuente, en este caso el reconectador Bazar Mary, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.18.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                      |                    |         |         |         |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between RecloMary and Bazar Mary. Adjacent to Ce020_RecMary. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                              | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                   | Bazar Mary         | 3.066   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 374                                                                                    | Cerrillos-Matadero | 2.984   | 314     | 374     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 566                                                                                    | Puente Tejar       | 2.897   | 506     | 566     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.18** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Bazar Mary

▪ **Reconectador Concorde**

En la figura A.1.19 se muestra las curvas actuales de los reconectadores Concorde, Bermejo y Quijongo.



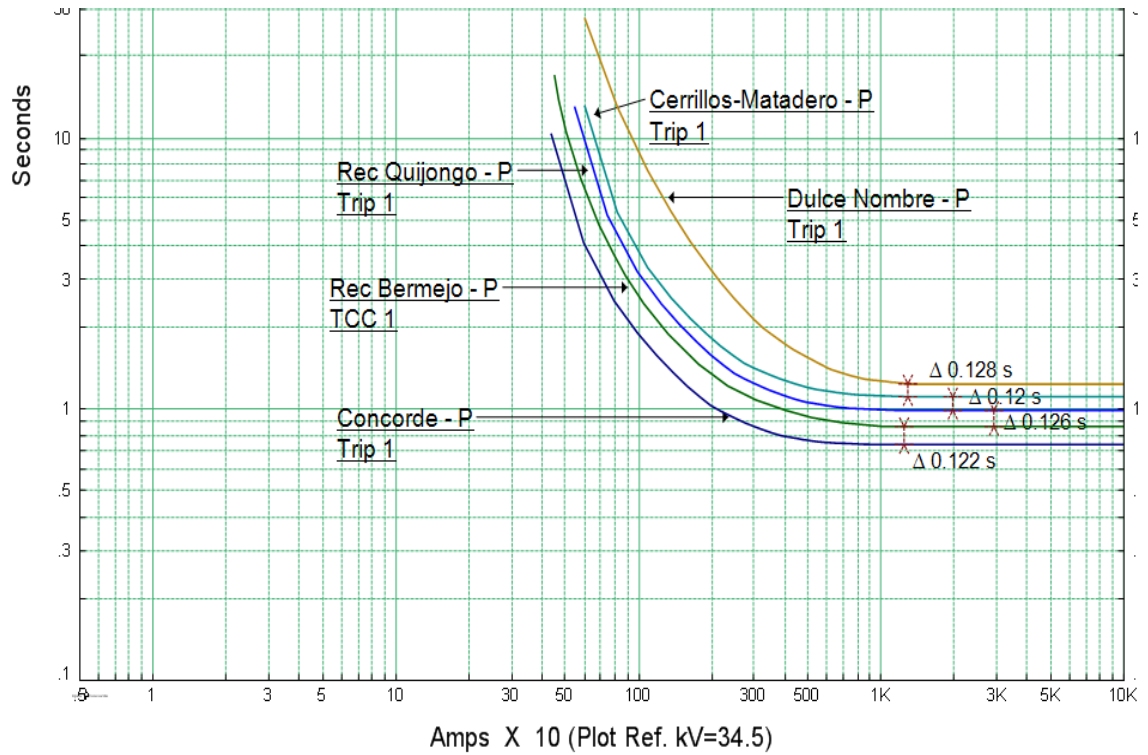
**Figura A.1.19** Curvas actuales de los reconectadores del circuito Cerrillos y el reconectador Concorde

Simulando una falla cerca del reconectador Concorde, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.20.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                                              |                    |         |         |         |                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|------------------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Ze3090_SicorsaFlorentina and Concorde. Adjacent to Ze3090_SicorsaFlorentina. |                    |         |         |         |                                                |
| Time (ms)                                                                                                      | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                                      |
| 60.4                                                                                                           | Rec Bermejo        | 2.264   | 15.4    | 60.4    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC            |
| 296                                                                                                            | Rec Quijongo       | 2.213   | 236     | 296     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |
| 462                                                                                                            | Cerrillos-Matadero | 2.174   | 402     | 462     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |
| 2795                                                                                                           | Rec1 Florentina    | 2.427   | 2735    | 2795    | 1st Operation - Lockout - Phase - Trip 1 - TOC |
| 2874                                                                                                           | Concorde           | 2.266   | 2814    | 2874    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |
| 4759                                                                                                           | Dulce Nombre       | 2.123   | 4699    | 4759    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC           |

**Figura A.1.20** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Concorde

La figura A.1.21 muestra las curvas propuestas para los reconectadores del circuito Cerrillos y el reconectador Concorde, para el caso en que el circuito Cerrillos energiza al circuito Grupo Z.



**Figura A.1.21** Curvas propuestas de los reconectadores implicados con el cierre del reconectador Concorde

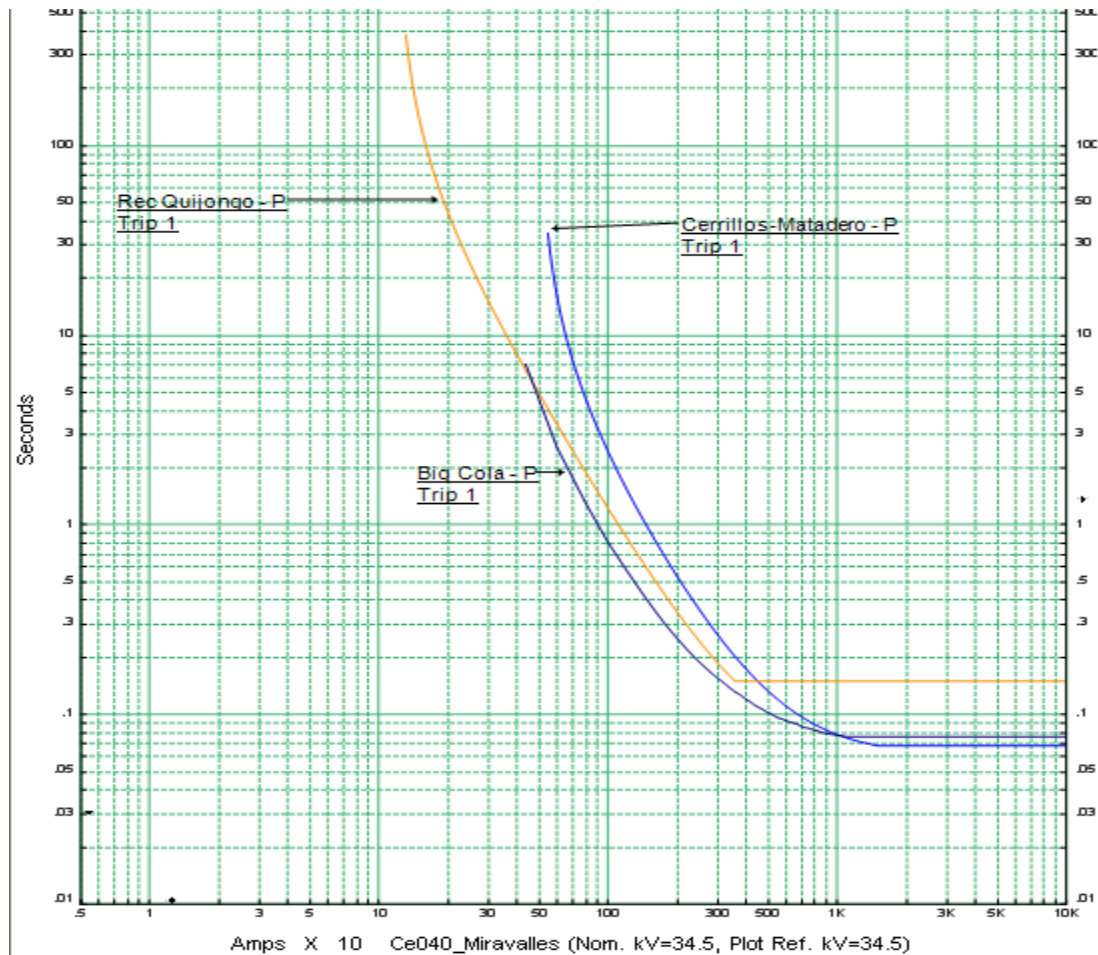
En la siguiente figura se muestra los tiempos necesarios para despejar una falla cercana al reconectador Concorde utilizando las curvas propuestas.

| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                                     |                    |         |         |         |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Ze3090_SicorsaFlorentina and Concorde. Adjacent to Ze3090_SicorsaFlorentina. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                                      | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 962                                                                                                            | Concorde           | 2.266   | 902     | 962     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - T0C |
| 1239                                                                                                           | Rec Bermejo        | 2.264   | 1194    | 1239    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - T0C  |
| 1462                                                                                                           | Rec Quijongo       | 2.213   | 1402    | 1462    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - T0C |
| 1708                                                                                                           | Cerrillos-Matadero | 2.174   | 1648    | 1708    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - T0C |

**Figura A.1.22** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Concorde

- **Cuchillas 230**

En la figura A.1.23 se muestra las curvas actuales de los re conectadores Cerrillos, Big Cola y Quijongo.



**Figura A.1.23** Curvas actuales de los re conectadores de los circuitos Cerrillos y La Flor

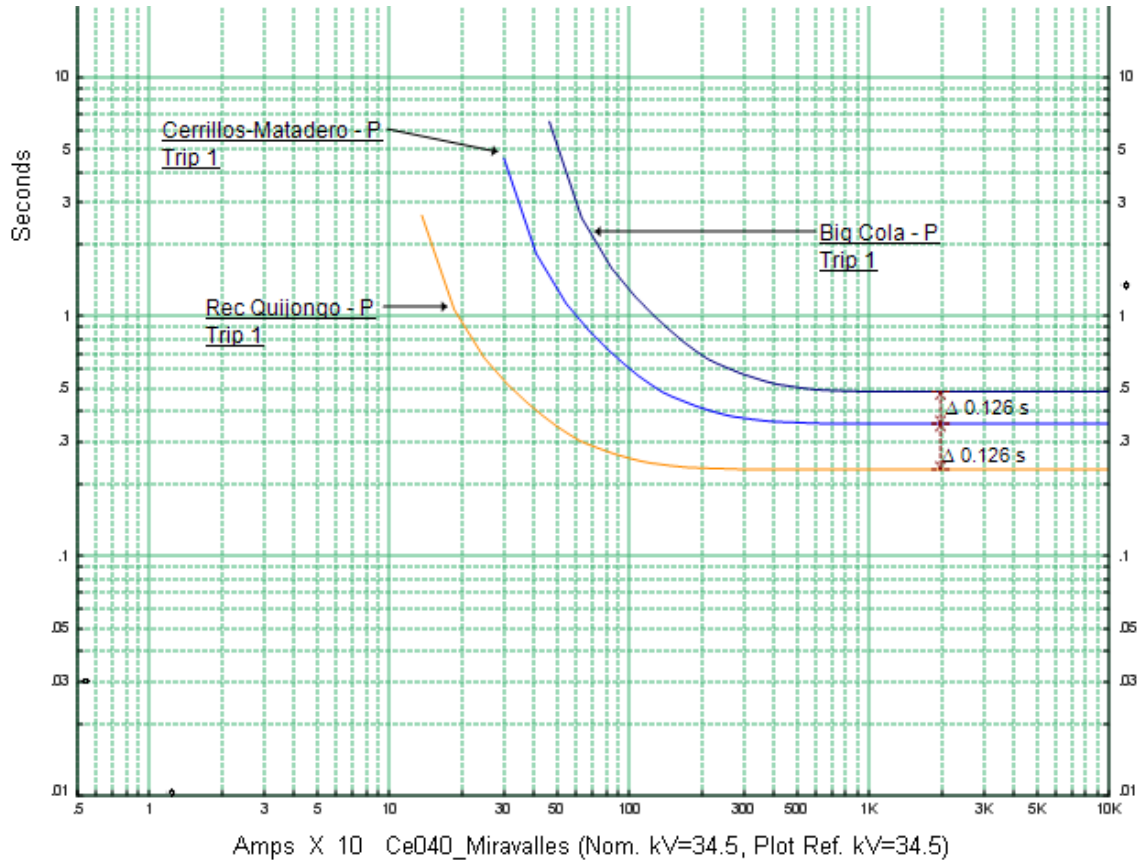
Simulando una falla cerca del re conectador PI Coca Cola, se obtienen los tiempos que se muestran en la figura A.1.24.



| Sequence-of-Operation Event Summary Report                                                      |                    |         |         |         |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between PI CocaCola and RMEnt2PIIndustrial. Adjacent to RMD80_Ent2PI. |                    |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                       | ID                 | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 105                                                                                             | Ceinsa             | 3.818   | 45.4    | 105     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 196                                                                                             | Cerrillos-Matadero | 3.678   | 136     | 196     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 1045                                                                                            | PI CocaCola        | 4.185   | 1000    | 1045    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 1613                                                                                            | Duke Nombre        | 3.623   | 1553    | 1613    | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.24** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador PI Coca Cola

La figura A.1.25 muestra las curvas propuestas para los reconectadores Big Cola, Cerrillos y Quijongo, para el caso en que el circuito Cerrillos energiza al circuito Grupo Z.



**Figura A.1.25** Curvas propuestas de los reconectadores implicados con el cierre de las Cuchillas



En la siguiente figura se muestra los tiempos necesarios para despejar una falla cercana al reconectador Bermejo utilizando las curvas propuestas.

| <u>Sequence-of-Operation Event Summary Report</u>                                                    |              |         |         |         |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|
| Symmetrical 3-Phase Fault between Rec Bermejo and ZeBermejo_Quebradilla. Adjacent to Ce_Quebradilla. |              |         |         |         |                                      |
| Time (ms)                                                                                            | ID           | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition                            |
| 60.3                                                                                                 | Rec Bermejo  | 2.295   | 15.3    | 60.3    | 1st Operation - Phase - TCC 1 - TOC  |
| 149                                                                                                  | Ceinsa       | 0.401   | 87.3    | 149     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 230                                                                                                  | Rec Quijongo | 2.235   | 170     | 230     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |
| 792                                                                                                  | Big Cola     | 1.659   | 732     | 792     | 1st Operation - Phase - Trip 1 - TOC |

**Figura A.1.26** Tiempos para aislar una falla cerca del reconectador Bermejo